

ERKLÄRUNGEN PHYSIKALISCHER PHÄNOMENE MIT MODELLEN

Entwicklung und Anwendung eines Verfahrens zur Analyse sprachlicher Erklärungen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium

(Dr. rer. nat.) im Fach Physik

eingereicht an der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin

von

M.Ed. Steffen Wagner

Präsidentin der Humboldt-Universität zu Berlin,

Prof. Dr.-Ing. Dr. Sabine Kunst

Dekan der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät,

Prof. Dr. Elmar Kulke

Gutachter:

Prof. Dr. Burkhard Priemer (Humboldt-Universität zu Berlin)

Prof. Dr. Lydia Murmann (Universität Bremen)

Prof. Dr. Hendrik Härtig (Universität Duisburg-Essen)

Datum der Verteidigung: 27.II.2017

ZUSAMMENFASSUNG

Physiklernende haben Schwierigkeiten sowohl dabei, Phänomene fachlich angemessen zu erklären, als auch bei der Verwendung von Modellen. Diese Schwierigkeiten treten häufig im Bereich optischer Phänomene zutage. Ein Blick auf das, was in Lehr-Lern-Kontexten eigentlich als Modell verstanden wird, zeigt, dass in diesen Kontexten weder ein einheitlicher noch weitgehend ein praxisorientierter Modellbegriff Grundlage für das Lehren und Lernen von Physik ist. Ziel dieser Arbeit ist es, Schwierigkeiten bei der Verwendung von Modellen in Erklärungen vor dem Hintergrund eines solchen praxisorientierten Modellbegriffs präzise zu benennen, zu lokalisieren und fachdidaktische Schlussfolgerungen daraus zu ziehen. Unter der Maßgabe eines konsistenten Vorgehens wird ausgehend von einer bereits existierenden Charakterisierung von Modellen nach Passmore, Gouvea und Giere (2014) ein praxisrelevanter Modellbegriff entwickelt und dargelegt, wie Erklärungen in Bezug auf diesen Begriff zu verstehen sind. Als wesentliches Merkmal von Modellen stellt sich dabei ihre Position als Vermittler zwischen Phänomenen und Theorien heraus, in der sie zweckgerichtet relevante Ausschnitte dieser beiden Domänen repräsentieren. Dabei ist zwischen Modellen und ihren externen Darstellungen zu unterscheiden. Sprachliche Erklärungen sind demnach sprachliche Darstellungen von Modellen mit den genannten Merkmalen. Im Anschluss an die Ausformulierung wird zur Untersuchung der Schwierigkeiten Physiklerner ein Verfahren entwickelt, um die Modellstruktur in sprachlichen Erklärungen zu visualisieren. Als geeignete Darstellung dieser Struktur erweisen sich Concept Maps, die jedoch noch um eine inhärente Kategorienstruktur erweitert werden, um zwischen relevanten und nicht relevanten Elementen von Phänomenen und Theorien unterscheiden zu können. Das Verfahren zum Erstellen von kategorienorientierten Concept Maps kann auf Basis einer Vorstudie als reliabel und valide gekennzeichnet werden. In einer qualitativen Untersuchung von 64 Erklärungen, die von Physiklernenden und Experten zu Phänomenen der optischen Hebung mit Hilfe des Strahlenkonzepts der Optik erstellt wurden, wird das Verfahren angewendet. Dabei können verschiedene Schwierigkeiten präzise benannt werden. Studierende führen das Phänomen teilweise einzig auf den Begriff der 'Brechung' von Licht zurück, ohne diesen Zusammenhang präzise darzulegen. In einigen Erklärungen werden Begriffe aus nicht relevanten optischen Konzepten eingebunden, es fehlen zentrale Elemente oder Erklärungen zerfallen in ihre Einzelteile. Vor allem die Schnittstelle zwischen Phänomenen und Theorien zeigt sich besonders fehleranfällig. Kategorienorientierte Concept Maps eignen sich auch, um auf Basis der fehlerbehafteten Erklärungen Vorschläge für konstruktive Interventionen zu entwickeln, die zu einer fachlich angemessenen Erklärung führen. Die Ergebnisse belegen die Notwendigkeit und Fruchtbarkeit eines praxisorientierten Modellbegriffs.

ABSTRACT

Using models in a disciplinary proper manner and giving appropriate explanations for natural phenomena sets off difficulties among science learners, for example for optics phenomena. Looking at the underlying conception of models in science education, two abuses can be found: there is no standardized model conception and most conceptions do not consider how models are used in science itself. Hence, goal of this thesis is the precise identification, localization and interpretation of learners difficulties using models for an explanation, based on an authentic model conception. In a first step, this authentic conception is developed, starting with a refinement of a framework given by Passmore, Gouvea, and Giere (2014), wherefrom a description of ‘explanations’ can be directly derived. The position of models as functional mediators between phenomena and theory, representing relevant aspects of these two instances, turns out to be a core characteristic, whereas models are not to be equated with their external representations. Accordingly, (e.g.,) written explanations are linguistic presentations of models, containing elements of phenomena and theory. After establishing this framework, a procedure will be developed directly from the given description of models in order to visualize the structure of written explanations. The result is a modified network visualization based on concept maps, that identifies relevant and non-relevant elements of phenomena and theories in an explanation. This visualization is called ‘categorized concept map’. In a preliminary study, the procedure can be described as reliable and valid. In a following qualitative investigation of 64 explanations of optics phenomena (‘apparent depth’) by means of light rays, given by university physics students and experts, categorized concept maps are used to identify difficulties in giving appropriate explanations. Students trace back the observed phenomena only to the term of ‘refraction’, instead of precisely describing the interrelation between ray optics and those phenomena. Furthermore, elements of other conceptions (waves, particles) appear in some of the explanations, whereas central elements of ray optics (i.e., image concept) are missed. The cut point between theory and the real world turns out to be the most fragile part in students models. Categorized concept maps show their strength in making a variety of difficulties visible and also in subsequently giving the opportunity to develop an appropriate explanation. The results show both, the need and the fruitfulness of an authentic model conception.

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
1 Einleitung	10
2 Entwicklung eines Modellbegriffs	14
2.1 Ausgangslage	15
2.2 Ziel der Entwicklung	22
2.3 Beschreibung der Entwicklung	22
2.4 Ergebnisse und Implikationen	28
3 Verfahrensentwicklung	38
3.1 Ausgangslage	39
3.2 Ziel der Entwicklung	43
3.3 Beschreibung der Entwicklung	44
3.4 Ergebnisse und Implikationen	54
4 Empirische Untersuchung	59
4.1 Ausgangslage	60
4.2 Forschungsfragen	65
4.3 Methoden	66
4.4 Ergebnisse	69
4.5 Diskussion	95
5 Fazit	107
Anhänge	III
A Physikalische Grundlagen	II2
A.1 Beschreibung der Brechung im Wellenkonzept	II2
A.2 Beschreibung der Brechung im Strahlenkonzept	II3
A.3 Beschreibung der Brechung mit dem Fermatschen Prinzip	II4
A.4 Optische Hebung	II4
B Kodiermanual	II8
B.1 Einleitung	II8
B.2 Erster Schritt: Identifikation der Elemente	II9

B.3	Zweiter Schritt: Kategorisierung der Elemente	125
B.4	Dritter Schritt: Identifikation der Beziehungen	127
B.5	Vierter Schritt: Fachliche Bewertung der Aussagen	131
B.6	Kodierregeln	133
B.7	Glossar grammatikalischer Begriffe	134
C	Vorstudie	135
C.1	Forschungsfragen	135
C.2	Methode	136
C.3	Ergebnisse	138
C.4	Interpretation und Implikationen	144
C.5	Fazit der Vorstudie	149
D	Gütekriterien	150
D.1	Identifikation und Kategorisierung der Elemente	151
D.2	Identifikation der Beziehungen	151
D.3	Bewertung der Aussagen	153
E	Materialien der Vorstudie	155
E.1	Erklärungen	155
E.2	Kodierungen	161
E.3	Kodierungen durch zwei Beurteiler	171
F	Materialien der Hauptstudie	181
F.1	Erklärungen	181
F.2	Kodierungen	206
F.3	Kodierungen durch zwei Beurteiler	255
G	Kategorienorientierte Concept Maps	286
G.1	Maps der Vorstudie	286
G.2	Maps der Hauptstudie	299
H	Arbeitsauftrag zur Hauptstudie	396
	Literatur	397

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1	Einleitung	10
2	Entwicklung eines Modellbegriffs	14
2.1	Teller mit scheinbar unterschiedlicher Lage in einem Spülbecken	24
2.2	Visualisierung des Modellbegriffs und des Begriffs des Modellierens	29
2.3	Visualisierung von Modellen zu verschiedenen ausgewählten Zwecken	31
2.4	Abbildung zur Erklärung des Phänomens von scheinbar verkürzten Beinen	35
3	Verfahrensentwicklung	38
3.1	Concept Map	41
3.2	Propositionales Netzwerk	42
3.3	Mind Map	43
3.4	Semiotisches Dreieck	45
3.5	Visualisierung der Kategorien	49
3.6	Vergleich CM vs. kCM	49
3.7	Verschiedene Konstellationen von Elementen und Beziehungen in kCMs	49
3.8	Beziehungen und eine Metabeziehung zwischen drei Elementen in einer kCM	52
3.9	Horizontale Struktur in einer kCM	52
3.10	Kennzeichnung inkorrektur Propositionen in einer kCM	52
4	Empirische Untersuchung	59
4.1	Beispiel für die Lage fehlerhafter Beziehungen	82
4.2	Beispiel für eine bereinigte Map	83
4.3	Boxplots für die relative Anzahl der fehlerhaften Beziehung für alle Phänomene	85
4.4	Boxplots für die relative Anzahl der fehlerhaften Beziehung für einzelne Phänomene	86
4.5	Histogramme für die relativen Fehlerhäufigkeiten	86
4.6	Beispiel für eine vervollständigte Map	106
4.7	Bereinigte und verkleinerte Version von co4-C	106
5	Fazit	107
A	Physikalische Grundlagen	112
A.1	Brechung ebener Wellen	112
A.2	Brechung von Strahlen	113
A.3	Lichtwege bei der Brechung mit dem Fermatschen Prinzip	114
A.4	Schematische Darstellung der sagittalen und meridionalen Hebung I	116
A.5	Schematische Darstellung der sagittalen und meridionalen Hebung II	116

B	Kodiermanual	118
B.1	Vergleich CM vs. kCM	119
B.2	Abbildung zur Erklärung der optischen Hebung einer Münze in einem Lehrbuch	120
B.3	Verschiedene Konstellationen von Elementen und Beziehungen in kCMs	128
C	Vorstudie	135
C.1	Phänomen A - Brechung eines Laserstrahls	137
C.2	Phänomen B - Optische Hebung einer Münze	137
C.3	Phänomen C - Scheinbarer Knick in einem Stift	137
C.4	so4-A ursprünglich	143
C.5	so4-A bereinigt	143
C.6	so7-C ursprünglich	143
C.7	so7-C bereinigt	143
C.8	so9-B ursprünglich	143
C.9	so9-B bereinigt	143
C.10	Lichtweg in br-B (I)	144
C.11	Lichtweg in br-B (II)	144
C.12	Lichtweg in so6-B	144
C.13	Lichtweg in so1-C	144
C.14	br-B mit Betweenness	145
C.15	eo3-B mit Betweenness	145
C.16	Gegenüberstellung der beiden Erklärungen des Experten eo3 zum Phänomen A	147
D	Gütekriterien	150
D.1	Formale Darstellung möglicher Beziehungen	153
E	Materialien der Vorstudie	155
F	Materialien der Hauptstudie	181
G	Kategorienorientierte Concept Maps	286
H	Arbeitsauftrag zur Hauptstudie	396
H.1	Arbeitsauftrag der Hauptstudie	396
	Literatur	397

TABELLENVERZEICHNIS

1	Einleitung	10
2	Entwicklung eines Modellbegriffs	14
3	Verfahrensentwicklung	38
4	Empirische Untersuchung	59
4.1	Übersicht: Erklärungen der Hauptstudie	67
4.2	Übersicht: Teilstichprobe zur Beurteilerübereinstimmung	68
4.3	Beurteilerübereinstimmung in der Hauptstudie	70
4.4	Elemente in den Kategorien 1 und 4 (Teil 1)	72
4.5	Elemente in den Kategorien 1 und 4 (Teil 2)	73
4.6	Verwendung zentraler Elemente für das Phänomen A	74
4.7	Verwendung zentraler Elemente für die Phänomene B und C	75
4.8	Werte für Kendalls τ	87
4.9	Ergebnisse der Kruskal-Wallis-Tests	87
4.10	Mediane der relativen Fehlerhäufigkeiten	88
4.11	Ergebnisse der Wilcoxon-Tests	89
4.12	Abgetrennte Fragmente	93
5	Fazit	107
A	Physikalische Grundlagen	112
B	Kodiermanual	118
B.1	Beispiele für verschiedene Typen von Beziehungen	127
B.2	Regeln zur Bewertung von Propositionen als fachlich inkorrekt	131
B.3	Kodierregeln für die Kategorienzuordnung	133
C	Vorstudie	135
C.1	Übersicht: Erklärungen der Vorstudie	138
C.2	Beurteilerübereinstimmung in der Vorstudie (1)	138
C.3	Kontingenztafel der Beurteilerübereinstimmung in der Vorstudie (1)	139
C.4	Beurteilerübereinstimmung in der Vorstudie (2)	140
C.5	Kontingenztafel der Beurteilerübereinstimmung in der Vorstudie (2)	140
C.6	Kennwerte für die Beurteilerübereinstimmung der fachlichen Bewertung	140

D	Gütekriterien	150
D.1	Kontingenztafel für die fachliche Bewertung	154
E	Materialien der Vorstudie	155
E.1	Betweenness für b1-B	162
E.2	Betweenness für eo3-B	166
F	Materialien der Hauptstudie	181
G	Kategorienorientierte Concept Maps	286
H	Arbeitsauftrag zur Hauptstudie	396
	Literatur	397

I EINLEITUNG

„What science says about the world is not science itself. Science itself is the human activity that produces these statements and theories, and to learn science is not to learn what the last generation of scientists thought the world was like: it is to learn how each new generation of scientists re-makes our view of the world. Ultimately, it is to learn how to have some degree of participation in this process of invention and discovery.“ (Lemke, 1998)

In diesem Zitat werden verschiedene Aspekte zur Charakterisierung der Naturwissenschaften, wie etwa der Physik, und auch zur Charakterisierung des Lernens und Lehrens dieser Disziplinen angesprochen. Einer der Aspekte erscheint derart selbstverständlich, dass ihm gemeinhin stillschweigende Zustimmung gewährt wird, nämlich, dass Wissenschaftler überhaupt ‘die Welt’ und ‘Theorien’ in Bezug zueinander zu setzen, und zwar in sich fortentwickelnder Weise. Ein anderer Aspekt ist die Forderung danach, dass Lehr-Lern-Situationen die Art und Weise berücksichtigen, wie Wissenschaftler diese Verbindung herstellen. Diese Forderung nach Authentizität ist in den vergangenen drei Jahrzehnten lauter geworden (vgl. u.a. J. K. Gilbert, 2004; Hoettecke & Rieß, 2015; Passmore et al., 2014).

Daher gelten Erklärungen von Ausschnitten der beobachtbaren Welt mit Hilfe geeigneter Theorien als eine der Hauptaufgaben sowohl naturwissenschaftlichen Arbeitens (u.a. Giere, 1988; Morrison, 1999) als auch des Lehrens und Lernens auf diesem Gebiet (u.a. J. K. Gilbert, Boulter & Rutherford, 1998; Passmore et al., 2014; Windschitl, Thompson & Braaten, 2008). Eine zentrale Stellung in dem Zusammenhang zwischen der beobachtbaren Welt der Phänomene und etablierten und elaborierten Theorien bilden Modelle in der wissenschaftlichen Praxis (u.a. Frigg & Hartmann, 2017; Morrison, 1999) und in Bezug auf das Lernen (u.a. Chittleborough & Treagust, 2007; J. K. Gilbert, 2004; Harrison & Treagust, 2000; Kircher, 2015). Dementsprechend sind Modelle und Erklärungen oder Vorhersagen eng miteinander verwoben. So tauchen Modelle zum Beispiel in Vorhersagen über das Verhalten von Wetterphänomenen auf und ziehen in diesem Kontext auch öffentliche Aufmerksamkeit auf sich (Baucum, 2017). Astrophysiker versuchen mit Hilfe von Modellen die Entstehung von Kometen nachzuvollziehen (Blum, Gundlach, Güttler & Sierks, 2017). Nicht zuletzt spielten Modelle für die Erklärung neu entdeckter Phänomene in der Geschichte der Physik eine große Rolle, wie z.B. die Entwicklung von Atommodellen belegt (Eckert, 2013).

Gleichzeitig fällt Lernenden der Naturwissenschaften sowohl der sachgemäße Umgang mit Modellen allgemein (u.a. Grosslight, Unger, Jay & Smith, 1991; Krell, Reinisch & Krüger, 2015; Pluta, Chinn & Duncan, 2011) als auch das fachlich angemessene Verwenden naturwissenschaftlicher Konzepte für Erklärungen von Phänomenen (u.a. Cheng & Brown, 2015; Kokkonen & Mäntylä, 2017; Peker & Wal-

lace, 2011) schwer. Beginnt man die Suche nach Ursachen für diese Schwierigkeiten bei dem zugrundeliegenden didaktischen Verständnis davon, was ein Modell überhaupt ist, so treten zwei Probleme zutage. Erstens, der Modellbegriff wird in didaktischen und wissenschaftlichen Kontexten inkongruent verwendet (Passmore et al., 2014). Zweitens, die didaktische Verwendung von Modellbegriffen ist inkonsistent.

Zum ersten Problem. Modelle tauchen in einigen physikdidaktischen Konzeptionen etwa im Sinne von Abbildern für ein Original auf, so wie ein Spielzeugauto ein Abbild eines richtigen Autos ist (Kircher, 2015; Mikelskis-Seifert, 2010), während sie in wissenschaftstheoretischen Kontexten als abstrakte Entitäten (Gieryn, 1988) in Erscheinung treten und in der Physik selbst sowie in anderen Naturwissenschaften in eher anwendungs- und zweckbezogenen Zusammenhängen verwendet werden (vgl. Morrison, 1999). Deutlich wird dieses unterschiedliche Verständnis am Beispiel des sogenannten ‘Strahlenmodells’ von Licht. Das Strahlenmodell oder das ‘Modell des Lichtstrahls’ ist als eigenständiger Begriff in Schulbüchern der Sekundarstufe oft vertreten (z.B. Bader, 2001; Bayer et al., 2011; Cieplik, 2006; Meyer & Schmidt, 2007). Nach wie vor haben Physiklernende jedoch Schwierigkeiten bei der Verwendung von Lichtstrahlen für verschiedene Zwecke (u.a. Galili & Hazan, 2000; Kaewkhong, Mazzolini, Emarat & Arayathanikul, 2010; Wiesner, 1986). In gängigen physikalischen Gesamt- oder speziell Optikdarstellungen, die als Lehrbücher für die Hochschule eingesetzt werden, taucht der Begriff des Modells im Zusammenhang mit Lichtstrahlen dagegen entweder gar nicht auf (z.B. Hecht, 2009; Meschede, Gerthsen & Vogel, 2015; Nolting, 2013; Tipler & Mosca, 2012), oder es wird versucht, das mit diesem Begriff bezeichnete Konstrukt anders zu benennen, z.B. als „Modell der Lichtausbreitung entlang ‘Lichtstrahlen’“ (Niedrig, 2004, S. 37, Hervorhebung im Original) oder als „Näherungsmodell des Lichtbündels“ (Demtröder, 2009, S. 267). Natürlich werden in diesen Werken Lichtstrahlen oder -bündel im Rahmen der geometrischen Optik betrachtet und benutzt, aber sie bilden hier eben kein eigenständiges Modell. Nolting spricht stattdessen beispielsweise vom „Konzept der Lichtstrahlen“ (S.353). Das Strahlenmodell taucht im wissenschaftlichen Kontext erst wieder in stärker anwendungsbezogenen Zusammenhängen wie z.B. in der technischen Optik (z.B. Litfin, 2005) oder in der Akustik auf. Klar ist, dass in Lehr-Lern-Situationen nicht die gleichen Modelle auf die gleiche Art und Weise benutzt werden können wie in komplexen wissenschaftlichen Fragestellungen. Zumindest sollten jedoch die wesentlichen wissenschaftlichen Begriffe und Methoden in Lehr-Lern-Prozessen der Physik authentisch und anschlussfähig abgebildet werden (KMK, 2005), erst recht im Rahmen des Physikstudiums. Der Versuch, Schwierigkeiten Physiklerner bei der Verwendung von Modellen, z.B. in Erklärungen von Phänomenen, präzise zu beschreiben und Implikationen für die Gestaltung von Lehr-Lern-Situationen daraus zu ziehen, bedarf jedoch eines authentischen Modellbegriffs. Dieser Modellbegriff ist stark durch seine Zweck- oder Funktionsorientierung geprägt. Daher ist das erste Ziel dieser Arbeit die Entwicklung eines ebensolchen, sich an der wissenschaftlichen Praxis orientierenden, funktionalen Modellbegriffs.

Zum zweiten Problem. Modelle in Lehr-Lern-Situationen sind nicht nur inkongruent zu Modellen in der wissenschaftlichen Praxis, sie werden auch innerhalb der einzelnen fachdidaktischen Konzeptionen

nen teilweise inkonsistent oder widersprüchlich verwendet. Die Begriffskonstruktion erfolgt dabei beispielsweise auf Basis von Kategorisierungen, die für die Erstellung der Kategorien wechselnde Kriterien benutzen (z.B. Harrison & Treagust, 2000), oder es wird nicht zwischen Modellen und (ihren) Darstellungen unterschieden (vgl. dazu z.B. Passmore et al., 2014). So wird unter anderem zwischen ikonischen (bildlichen), symbolischen und mathematischen Modellen unterschieden (Kircher 2013; vgl. Harrison & Treagust, 2000). Eine Zuordnung beispielsweise des Bohrschen Atommodells zu einem dieser Modelltypen erscheint unplausibel, da Bohr in der Vorstellung seines Modells sowohl sprachliche (also symbolische) als auch mathematische Darstellungsweisen verwendet (siehe Bohr, 1981). In Lehrbüchern taucht dagegen häufig eine (ikonische) Abbildung auf, in der sich Elektronen auf Kreisbahnen um einen Atomkern bewegen (z.B. Meyer & Schmidt, 2007, S. 167), die Bohr selbst nicht nutzt. Weder die Typologisierung selbst, noch die Identifikation von Modellen mit ihren Darstellungsweisen erfasst also offenbar konsistent deren Natur.

Soll die Verwendung von Modellen in Lehr-Lern-Situationen, beispielsweise bei Erklärungen von Phänomenen, vor dem Hintergrund eines sich an der wissenschaftlichen Praxis orientierenden Rahmenkonzepts untersucht werden, dann bedarf es eines Analyseverfahrens, das die Eigenschaften von Modellen aus einer solchen praxisorientierten Perspektive explizit berücksichtigt. Da ein solches Verfahren speziell für diesen Zweck noch nicht existiert, ist dessen Entwicklung (und daraus resultierender Darstellungen) in Form eines Kodiermanuals (und einer speziellen Form von Concept Maps) das zweite Ziel dieser Arbeit. Dieser Aspekt gewährleistet die Konsistenz der theoretischen Grundlagen und der angewendeten Methode. Schließlich sollen dieses Verfahren und dessen Endprodukt genutzt werden, um die Verwendung von Modellen empirisch zu untersuchen und so, explorativ und qualitativ, Merkmale und Schwierigkeiten in der Verwendung von Modellen in Erklärungen zu identifizieren und daraus Rückschlüsse für das Lernen von Physik allgemein und für den Umgang mit Modellen im Besonderen zu ziehen.

Zusammengefasst bestehen die drei Forschungsziele dieser Arbeit also darin,

1. einen fachdidaktisch angemessenen Modellbegriff zu entwickeln, der in Einklang mit der Verwendung von Modellen in den Naturwissenschaften ist,
2. ein Verfahren bzw. Instrument zu entwickeln, das aufbauend auf einem fachdidaktisch angemessenen Modellbegriff in der Lage ist, den Umgang mit Modellen von Physiklernenden detailliert und methodischen Standards entsprechend darzustellen, und
3. an einer geeigneten Stichprobe das auf einem angemessenen Modellbegriff entwickelte Verfahren hinsichtlich eines Aspekts beim Umgang mit Modellen, namentlich in Erklärungen, zu untersuchen.

Jedem dieser drei Ziele ist in dieser Arbeit ein eigenes Kapitel gewidmet. In jedem Kapitel wird einem der drei genannten Punkte nachgegangen, indem zunächst die jeweilige Ausgangslage skizziert und daraus die Entwicklungsziele beziehungsweise Forschungsfragen abgeleitet werden. Im Anschluss

werden das jeweilige Vorgehen und dessen Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Zur besseren Übersicht über die Teilschritte werden den drei Kapiteln eigene Unter-Inhaltsverzeichnisse vorangestellt. Da auf die physikalischen Grundlagen, auf das Kodiermanual sowie auf die Einschätzung der Güte des Verfahrens sowohl im zweiten als auch im dritten Teil der Arbeit Bezug genommen wird, sind diese drei Teile in den Anhang ausgelagert.

2 ENTWICKLUNG EINES MODELLBEGRIFFS

Inhalt des Kapitels

2.1	Ausgangslage	15
2.1.1	Implizite Modellkonzeptionen	17
2.1.2	Explizite Modellkonzeptionen	19
2.2	Ziel der Entwicklung	22
2.3	Beschreibung der Entwicklung	22
2.4	Ergebnisse und Implikationen	28
2.4.1	Festlegungen	28
2.4.2	Visualisierung des Modellbegriffs und des Modellierens	28
2.4.3	Eine Charakterisierung von Modellen auf der Ebene des Subjekts	31
2.4.4	Beispiel: Bildliche Darstellung eines Modells zur Erklärung der scheinbar verkürzten Beine einer Person im Wasser	34
2.4.5	Zusammenfassung und Ausblick	36

Physiklernende haben Schwierigkeiten sowohl im direkten Umgang mit Modellen, etwa im Rahmen von Erklärungen naturwissenschaftlicher Phänomene (z.B. Andersson & Kärrqvist, 1983; Galili & Hazan, 2000; Kokkonen & Mäntylä, 2017; Plummer & Maynard, 2014; Wiesner, 1986), als auch in einer angemessenen Vorstellung von Modellen als wissenschaftliche Instrumente (z.B. Grosslight et al., 1991; Krell et al., 2015; Treagust, Chittleborough & Mamiala, 2002). Sie verwechseln beispielsweise Eigenschaften von Modellen bzw. fiktionalen Entitäten mit denen realer Objekte (Mikelskis-Seifert & Fischler, 2003), nutzen unpassende Modelle in Erklärungen (Redfors & Ryder, 2001) von Phänomenen, oder entwickeln eigene, von einer fachlich richtigen Perspektive abweichende Vorstellungen (Wiesner, 1986).

Der Umgang mit Modellen unterscheidet sich somit deutlich von einer wissenschaftlichen Herangehensweise. Eine mögliche Ursache dafür kann darin liegen, dass der den Lehr-Lern-Situationen

zugrundeliegende Modellbegriff selbst von einem wissenschaftlichen Modellbegriff abweicht. So tritt dieses abweichende Verständnis beispielsweise auch im Zusammenhang mit dem Experimentierbegriff auf (Chinn & Malhotra, 2002). Hoettecke und Rieß (2015) zeigen, wie ein in diesem Sinne authentischerer Experimentierbegriff aus Sicht der Physikdidaktik aussehen kann. Eine solche Kohärenz ist auch im Hinblick auf Modelle wünschenswert. Notwendig dafür ist folglich ein Modellbegriff, der sich stärker an der wissenschaftlichen Praxis orientiert. Eine solche Orientierung weist die Modellkonzeption von Passmore et al. (2014) auf, die somit sich als Ausgangspunkt für eine Erschließung von Modellen anbietet.

Im Folgenden soll ein aus einer physikdidaktischen Perspektive praktikabler Begriff von Modellen entwickelt werden. Eine vollständige Neuerschließung dieses Begriffs ist dabei nicht vorgesehen. Vielmehr stellt diese Entwicklung eine Elementarisierung im Sinne einer Bestimmung des Elementaren und einer Vereinfachung dar (Bleichroth, 1991)¹. Die Notwendigkeit einer solchen Elementarisierung ergibt sich aus dem Umstand, dass es bestehenden Modellkonzeptionen nicht oder nicht hinreichend gelingt, wesentliche (elementare) Eigenschaften von Modellen zu erfassen und daraus konkrete fachdidaktische Implikationen abzuleiten. Diese Eigenschaften und Defizite sollen zunächst aufgezeigt werden.

Auf Basis einer der vorgestellten Konzeptionen von Modellen sollen die Eigenschaften von Modellen dann derart präzisiert und konkretisiert werden, dass Modelle visualisierbar und ihre Bedeutung für Lehr-Lern-Situationen deutlich werden. Daraus lassen sich direkte Implikationen für die Ausrichtung von naturwissenschaftlichen Lehr-Lern-Situationen, aber auch für Entscheidungen in Bezug auf fachdidaktische Forschung ableiten. Insbesondere sollen im Hinblick auf die nachfolgende Entwicklung eines Verfahrens zur Analyse von Modellen sowie dessen exemplarische Anwendung sprachliche Erklärungen von physikalischen Phänomenen in diesen Modellbegriff eingebettet werden.

2.1 AUSGANGSLAGE

Modellbegriff nach Passmore: Einen Ausgangspunkt für die Entwicklung eines angemessenen Modellbegriffs bietet die Konzeption von Passmore et al. (2014) bzw. Passmore (2015) an, denn sie fußt explizit auf einem wissenschaftlichen und praxisorientierten Verständnis von Modellen. Aus dieser Perspektive kann z.B. gezeigt werden, dass die individuellen Modelle von Laien (oder Lernenden) nicht grundverschieden von wissenschaftlichen Modellen sind, sondern letztere aufgrund des Zwecks, der sorgfältigeren Konstruktion sowie der systematischen Revision durch eine wissenschaftliche Gemeinschaft als Erweiterungen der zuerst genannten aufgefasst werden können. Die Konzeption geht explizit auf praxisrelevante Eigenschaften von Modellen ein. Mehr noch: in dem zugrundeliegenden Verständnis werden diese Eigenschaften als Grundpfeiler zur Konstruktion eines fachdidaktischen Modellbegriffs verwendet. Drei Eigenschaften stellen sich dabei als wesensprägend für Modelle heraus.

Erstens wird der Werkzeugcharakter als zentrales Merkmal hervorgehoben: „Models are defined by

¹Das Vorgehen bezieht sich dabei ursprünglich auf die Erschließung fachlicher Inhalte für die Unterrichtsvorbereitung.

the context of their use“ (Passmore et al., 2014, 1176 ff.). Das heißt, Modelle werden überhaupt nur durch die Art ihrer Verwendung (und Konstruktion) zu Modellen. Dieser Werkzeugcharakter spiegelt sich in einem wissenschaftstheoretischen Verständnis von Modellen wider, in dem Modelle aus einer praxisorientierten Perspektive betrachtet werden. Danach werden Modelle als wissenschaftliche Hilfsmittel zur Gewinnung von spezifischen Aussagen über die Natur eingesetzt (u.a. Frigg & Hartmann, 2017; Knuuttila, 2005; Morrison, 1999; Nersessian, 2002), vor allem im Rahmen von Erklärungen und Vorhersagen (J. K. Gilbert, 2004; Kircher, 2015), zur Exploration von Phänomenen (J. K. Gilbert, 2004; Morgan & Morrison, 1999) und zum Aufbau von Theorien (Morgan & Morrison, 1999).

Zweitens: Modelle haben die Eigenschaft, in unterschiedlichen externen Erscheinungsformen aufzutreten, z.B. visuell, verbal, formal, gegenständlich usw. (u.a. Frigg & Hartmann, 2017; J. K. Gilbert, 2004; Morgan & Morrison, 1999). In der Konzeption von Passmore wird in Bezug auf die unterschiedlichen Erscheinungsformen strikt zwischen Modellen und ihren externen Darstellungen unterschieden: „Models are distinct from the representational form they take“. Diese unterschiedlichen Erscheinungsformen führen zu einer Vielzahl von Klassifizierungen und Typologien von Modellen sowohl in der Wissenschaftstheorie (Frigg & Hartmann, 2017; Morgan & Morrison, 1999) als auch beim Lernen von Naturwissenschaften (Erduran & Duschl, 2004; J. K. Gilbert, 2004; Harrison & Treagust, 2000; Kircher, 2015).

Und drittens: Für die Beziehung von Modellen zu Phänomenen wählen Passmore et al. (2014) die Formulierung „Models are partial renderings of phenomena“, womit die Autoren einen Ansatz zur Beschreibung dieser Beziehung durch Morgan und Morrison (1999) zu Hilfe nehmen. Dagegen wird die Beziehung zu Theorien nur indirekt charakterisiert, indem die Argumentation von Boumans (1999) genutzt wird, der als Bestandteile von Modellen unter anderem sowohl empirische als auch theoretische Elemente auffasst. Auch von einem wissenschaftstheoretischen Standpunkt setzen Modelle die beobachtbare Welt und das etablierte Wissen zueinander in Beziehung², wobei in den verschiedenen Konzeptionen des Modellbegriffs die genaue Art dieser Beziehung unterschiedlich dargestellt wird. Aus einer an der wissenschaftlichen Praxis orientierten Perspektive haben Modelle demnach eine Stellung als Vermittler zwischen Phänomenen und Theorien (Morgan & Morrison, 1999). Auf diesen zuletzt genannten Aspekt wird später genauer eingegangen.

Damit wird sowohl die Stellung von Modellen zwischen Phänomenen und Theorien, als auch der Werkzeugcharakter und die unterschiedlichen Erscheinungsformen explizit in den Modellbegriff einbezogen, wodurch die Konzeption von Passmore et al. (2014) als Anker für einen aus einer physikdidaktischen Perspektive praktikablen Modellbegriff betrachtet werden kann.

Im Folgenden werden weitere unterschiedliche Konzeptionen eines Modellbegriffs im Rahmen des naturwissenschaftlichen Lernens dahingehend analysiert, ob und wie sie ebenfalls diese drei Eigen-

²Siehe dazu u.a. Bailer-Jones (2003), Cartwright (1983), Frigg und Hartmann (2017), Giere (1988), Knuuttila (2011), Morgan und Morrison (1999) und Suárez (2010) auf dem Gebiet der Wissenschaftstheorie, Erduran und Duschl (2004), J. K. Gilbert (2004), Harrison und Treagust (2000), Kircher (2015) und Passmore et al. (2014) aus der naturwissenschaftlichen Lehr-Lern-Forschung sowie Demtröder (2013) und Giancoli (2010) in fachphysikalischen Gesamtdarstellungen.

schaften erfassen. Dabei werden implizite und explizite Modellkonzeptionen unterschieden. Implizite Konzeptionen versuchen, Modelle über eine Klassifizierung zu erschließen, während explizite Konzeptionen Modellen explizit strukturelle und funktionale Merkmale zuweisen. Zwar nehmen auch explizite Konzeptionen Klassifizierungen von Modellen vor, jedoch ergeben sich diese dabei erst aus der Betrachtung struktureller und funktionaler Merkmale. Die Auswahl der dargestellten Konzeptionen umfasst wesentliche interdisziplinäre Ansätze im angloamerikanischen Sprachraum (Erduran & Duschl, 2004; J. K. Gilbert, 2004; Harrison & Treagust, 2000), einen im deutschen Sprachgebiet etablierten Modellbegriff der Physikdidaktik (Kircher, 2015) sowie eine strukturell auf Kircher aufbauende Konzeption (Mikelskis-Seifert, 2010). Die Autoren dieser Konzeptionen wählen dabei verschiedene Ausgangspunkte für ihre Begriffsentwicklung, die in den folgenden Beschreibungen jeweils detaillierter beschrieben wird.

2.1.1 Implizite Modellkonzeptionen

Klassifikation nach Erduran und Duschl: Erduran und Duschl (2004) entwickeln eine Charakterisierung von Modellen auf der Basis eines interdisziplinären Ansatzes mit Hilfe von verschiedenen Klassifikationen, unter anderem nach Bruner (1966) als Vertreter der kognitiven Psychologie, nach Giere (1991) als Vertreter der Wissenschaftsphilosophie sowie auf der Grundlage von Boulter und Gilbert (1996) aus dem Bereich des Lernens von Naturwissenschaften. Die Klassifikation erfolgt zwar für Modelle in der Chemie, die Autoren betonen jedoch den fachübergreifenden Anspruch dieser Konzeption.

Demnach sind Modelle Repräsentationen zwischen einem bekannten Objekt oder Phänomen als Quelle der Repräsentation und einem unbekannten Objekt oder Phänomen als Ziel der Repräsentation. Diese Charakterisierung ist zwar zulässig für Vorhersagen eines (noch unbekannten) Phänomens auf Basis einer (schon bekannten) Theorie. Im Falle einer Erklärung ist die Charakterisierung in dieser allgemeinen Form jedoch nicht mehr zutreffend, da dann, wenn ein Modell das Phänomen zu erklären imstande ist, die Phänomenstruktur ja gerade nicht mehr unbekannt ist. Auch lassen sich beobachtbare Systeme modellieren und sind demnach ebenfalls nicht unbekannt. Demzufolge ist die Repräsentationsbeziehung zwischen einer bekannten Quelle und einem unbekannten Ziel keine notwendige Eigenschaft zur Charakterisierung. Die Stellung von Modellen *zwischen* Phänomenen und Theorien wird überdies zwar exemplarisch anhand dreier Modelle zur Beschreibung von Säuren und Basen in der Chemie erläutert. Eine Konkretisierung dieses Zusammenhangs sowie daraus erwachsende Implikationen für Modelle in Lehr-Lern-Kontexten erfolgt jedoch nicht.

Außerdem werden verschiedene Erscheinungsformen von Modellen genannt, namentlich enaktive, ikonische, symbolische, konzeptuelle, analoge, skalierte und theoretische Modelle. Unklar bleibt dabei allerdings, wie die jeweilige Erscheinungsform mit dem Modell zusammenhängt: Sind Modelle in einer ikonischen (bildhaften) Darstellung zwingend verschieden von Modellen in einer sprachlichen (symbolischen) Darstellung? Die Charakterisierung von Modellen kann in der vorgestellten Art und Weise somit den Zusammenhang zwischen Modellen, Phänomenen und Theorien nicht hinreichend

beschreiben und auch die vielfältigen Erscheinungsformen von Modellen können nicht befriedigend erklärt werden. Gleichwohl wird die Bedeutung der Konstruktion und der Funktion von Modellen in den Naturwissenschaften beim Lernen hervorgehoben.

Typologie nach Harrison und Treagust: Harrison und Treagust (2000) entwickeln einen Modellbegriff für Lehr-Lern-Situationen mit Hilfe einer Typologie, die sich vor allem an den verschiedenen Erscheinungsformen von Modellen in unterrichtlichen Kontexten orientiert. Diese Erscheinungsformen werden entlang der Ausprägung *konkret* ↔ *konkret / abstrakt* ↔ *abstrakt* angeordnet. Darin sind skalierte Modelle (z.B. Modellboot) als konkret aufzufassen, theoretische (z.B. ideales Gas), mathematische ($F = ma$) und ikonische bzw. symbolische Modelle (z.B. chemische Gleichungen und Formeln) als abstrakt und sogenannte „Konzept-Prozess-Modelle“ (z.B. für die Brechung von Licht) als Hybride aus konkreten und abstrakten Elementen, etwa wenn die Richtungsänderung von Licht (abstrakt) mit der Änderung der Laufrichtung von Personen auf verschiedenen Untergründen (konkret) erklärt wird (S. 1016).

Wird diese Typologie vor dem Hintergrund der drei eingangs skizzierten Eigenschaften von Modellen betrachtet, entsteht erstens Unklarheit hinsichtlich der vielfältigen Erscheinungsformen, zweitens bleibt der Charakter von Modellen als wissenschaftliche Werkzeuge unbestimmt und drittens ist der Bezug von Modellen zu Phänomenen und Theorien verwirrend.

Die Konfusion in Bezug auf die Erscheinungsformen entsteht dadurch, dass die Typologisierung gleichzeitig auf unterschiedlichen Ebenen stattfindet. Zum einen werden Modelle nach der Art der verwendeten Zeichen bestimmt (ikonisch, symbolisch), zum anderen nach dem Größenverhältnis zwischen Modell und Zielsystem des Modells (skalierte Modelle), des Weiteren nach Übereinstimmungen in strukturellen Merkmalen (Konzept-Prozess-Modelle) oder nach dem Subjekt, dass das Modell betrachtet (mentale Modelle). So müssen nach dem Verständnis von Harrison und Treagust (2000) z.B. mathematische Modelle eigentlich immer auch als symbolische Modelle bezeichnet werden, weil mathematische Ausdrücke immer aus Symbolen bestehen und ikonische Modelle sind in gewisser Weise fast immer skaliert. Ikonische Modelle werden überdies in der Typologie zwar genannt, nicht jedoch beschrieben, sodass ihre Stellung und Bedeutung unklar bleibt. Somit bildet diese Typologie keine wirklichen Typen nach klar benannten Kriterien heraus und kann dadurch auch keine befriedigende Kennzeichnung von Modellen liefern.

In Hinblick auf den Werkzeugcharakter bleibt in dieser Typologie unklar, wie Modelle zur Generierung von Wissen über die Natur wirken, etwa zur Generierung von Hypothesen, zur Erschließung oder Erklärung von Phänomenen oder zum Aufbau von Theorien. Stattdessen beziehen sich die von Harrison und Treagust (2000) genannten Funktionen auf die perzeptuelle Zugänglichkeit: Modelle *zeigen* oberflächliche Proportionen (S. 1014), *beschreiben* etablierte theoretische Entitäten (S. 1016), *machen* nicht observable Entitäten wie Atome *sichtbar* (S. 1014) oder *stellen* physikalische Konzepte und Prozesse *bildlich dar* (S. 1016).

Schließlich wird der Zusammenhang zwischen Modellen und Phänomenen bzw. Theorien nur un-

zureichend oder sogar irreführend beschrieben. So wird beispielsweise die Erklärung des makroskopischen Verhaltens von Gasen (Druck, Volumen, Temperatur) mit Hilfe der kinetischen Gastheorie als *analogical models* im Sinne von punktgenauen Abbildungen wissenschaftlicher Phänomene betrachtet (S. 1016-1017), obwohl gerade die kinetische Gastheorie Annahmen macht, von denen wir wissen, dass sie eben keine exakten Abbildungen sind, weil z.B. die Größe der Teilchen vernachlässigt wird. Gleiches gilt für die Brechung von Licht, die in der Konzeption von Harrison und Treagust (2000) genannt wird, wobei sich die Brechung auf Licht im Strahlen- oder Wellenkonzept bezieht und z.B. Strahlen gerade nicht als reale Entitäten betrachtet werden können (Hecht, 2009). Somit kann es auch keine punktgenaue Abbildung in einem Modell geben. Für andere angeführte Modelle wird die Beziehung zu Theorien oder Phänomenen nicht weiter beleuchtet. Somit stellt die Typologie von Harrison und Treagust (2000) keine befriedigende Konzeption von Modellen dar.

2.1.2 Explizite Modellkonzeptionen

Modellbegriff nach Gilbert: J. K. Gilbert (2004) bezeichnet die Stellung von Modellen explizit als eine Brücke zwischen wissenschaftlichen Theorien und den Phänomenen, beispielsweise insofern, dass Modelle als „einfache Abbildungen“ oder Idealisierungen der beobachteten Realität (S. 116) auftreten können, zu denen die Theorie in Bezug gesetzt oder auf die sie angewendet wird. Damit versucht diese Konzeption von Modellen, ein kohärentes Bild zwischen Modellen in der Wissenschaft und in Lehr-Lern-Situationen zu erstellen. Als wissenschaftliche Werkzeuge können Modelle Beschreibungen von Phänomenen liefern oder Ausgangspunkt für Erklärungen und Vorhersagen sein.

Die vielfältigen Erscheinungsformen von Modellen (in Lehr-Lern-Situationen) entstehen dem Autor zufolge zum einen dadurch, dass es verschiedene Typen von Modellen in Bezug auf das sie benutzende Subjekt gibt (wissenschaftliche Modelle, unterrichtliche Modelle, historische Modelle, Mischformen dieser Modelle usw., S. 118) und zum anderen dadurch, dass jeder dieser Typen für den Zweck der Kommunikation in unterschiedlichen Modi der Repräsentation auftreten kann (gegenständlich, verbal, visuell, symbolisch oder gestisch, S. 118).

In der Konzeption bleibt offen, wann ein Modell eine Idealisierung, eine Abbildung oder eine Anwendung ist. Welche Eigenschaften des Modells unterscheiden sich zwischen diesen Formen? Insofern ist die Beziehung von Modellen zur Theorie bzw. zu Phänomenen eher abstrakt als konkret beschrieben. Darüber hinaus wird die Funktionalität von Modellen als wissenschaftliche Werkzeuge in unterschiedlichen Kontexten (Beschreibungen, Erklärungen, Vorhersagen) durch den Autor zwar hervorgehoben, jedoch bleibt auch hier unklar, wie diese Funktionen *konkret* ausgefüllt werden. Wie kann man an einem bestimmten Modell erkennen, ob es sich dabei etwa um eine Beschreibung, eine Erklärung oder um eine Vorhersage handelt? Dagegen ermöglicht die getrennte Betrachtung von Modellen und von Modi ihrer externen Repräsentation durch J. K. Gilbert (2004) auch eine Trennung zwischen unterschiedlichen Modellen und ihren Eigenschaften auf der einen Seite und unterschiedlichen Darstellungen eines Modells und deren Eigenschaften auf der anderen Seite.

Zusammengefasst kann die Konzeption von J. K. Gilbert (2004) dadurch charakterisiert werden, dass sie die wesentlichen Eigenschaften von Modellen nennt, aber vor allem in Bezug auf ihre Stellung *zwischen* Phänomenen und Theorien und in Bezug auf ihre Funktionen nicht konkret wird. Die Unterscheidung zwischen Modelltypen und externen Darstellungen ist bei der Konzeption eines kohärenten Modellverständnisses jedoch hilfreich.

Modellbegriff nach Kircher: Kircher (2015) liefert auf Basis eines modelltheoretischen Ansatzes, der vor allem strukturelle Merkmale von Modellen in den Vordergrund rückt, folgende Definition: „Ein Modell M ist ein von einem Subjekt S für bestimmte Zwecke und für eine bestimmte Zeit benutzter bzw. geschaffener Gegenstand oder theoretisches Konstrukt M derart, dass zu bestimmten Elementen von M ‘Analogien’ zu Elementen des Objekts O bestehen“ (S. 787). Diese Analogien seien Abbildungen in einem „metaphorischen“ und nicht in einem mathematischen Sinn („Abbildungsmerkmal“, S. 789), wobei durch diese Analogien Merkmale des Phänomens verkürzt auf das Modell projiziert werden. Es werden nur bestimmte Elemente von O in M abgebildet, nicht jedoch alle („Verkürzungsmerkmal“, S. 790). Darüber hinaus ist eine Unterscheidung in zwei Hauptklassen, namentlich gegenständliche und theoretische Modelle, möglich. Zu den theoretischen Modellen zählen „alle theoretischen Konstrukte“ (S. 785), insbesondere auch „zuverlässige Theorien“ (S. 785), wie die Newton’sche Mechanik. Theorien sind demnach also eine Art Unterklasse von Modellen. Gegenständliche Modelle treten als Struktur- bzw. Funktionsmodelle oder gestaltähnliche Modelle auf und sind als solche „Realisierungen von theoretischen Modellen“ (S. 791). Zu den gestaltähnlichen Modellen zählen beispielsweise „Schiffsmodelle“, „Fotografien“ und „Karikaturen von Politikern“ (S. 792)³. Der Werkzeugcharakter von Modellen wird nach Kircher über ihre Funktionen für Erklärungen und Prognosen sowie speziell in Lehr-Lern-Situationen für das Lernen von Naturwissenschaften gebildet. Dabei sind im Falle von Prognosen Merkmale des Objekts O unbekannt, die durch ein Modell M prognostiziert werden, während im Fall von Erklärungen die Merkmale des Objekts O bekannt sind.

In dieser Konzeption sind, wie oben erwähnt, Theorien den Modellen als Klasse untergeordnet. Somit haben Modelle hier eine andere Stellung als *zwischen* Phänomenen und Theorien wie bei J. K. Gilbert (2004) oder Morgan und Morrison (1999). Jede Theorie, wie etwa die klassische Mechanik, oder jedes theoretische Konstrukt als Modell zu bezeichnen, erscheint jedoch unangemessen, da es viel mehr Modelle sind, die sich bei den Theorien bedienen (Morrison, 1999), als es umgekehrt der Fall wäre. Weiterhin wird Modellen von Kircher selbst eher ein Charakter der „Vorläufigkeit“ zugewiesen (S. 784), während Theorien sich bereits als „zuverlässig“ bewährt haben (S. 785). Und schließlich kann die Bezeichnung aller theoretischen Konstrukte als Modelle nicht als haltbar betrachtet werden, da jede mathematische Gleichung zunächst ein theoretisches Konstrukt ist, nicht aber zugleich notwendigerweise ein Modell.

Der Werkzeugcharakter wird zwar explizit für Erklärungen und Vorhersagen erläutert, weitere wis-

³Hierbei ist jedoch fraglich, welche theoretischer Modelle in den genannten Beispielen realisiert werden und welche Relevanz ausgerechnet diese Realisierungen für die Physik haben.

senschaftliche Funktionen von Modellen, etwa im Rahmen einer Phänomenerschließung oder Theorieentwicklung werden jedoch nicht benannt. Und schließlich tritt auch bei Kircher das Problem auf, dass beispielsweise zwischen ikonischen und symbolischen Modellen unterschieden wird und dadurch verschiedene Darstellungsweisen mit verschiedenen Modellen assoziiert werden, statt, wie beispielsweise bei J. K. Gilbert (2004) von verschiedenen Darstellungsweisen ein und desselben Modells auszugehen: Das Bohrsche Atommodell bleibt das Bohrsche Atommodell, unabhängig davon, ob es symbolisch (z.B. sprachlich oder mathematisch) oder ikonisch ausgedrückt wird.

Im Überblick bietet der Modellbegriff nach Kircher eine Explikation der Beziehungen zwischen einem Modell und (realen) Objekten sowie einen Ansatz zur detaillierten Beschreibung von Erklärungen und Prognosen. Die Identifikation von Theorien als Unterklasse von Modellen sowie die Kategorisierung von Modellen ist jedoch nicht befriedigend.

Modellbegriff nach Mikelskis-Seifert: Bei Mikelskis-Seifert (2010) wird ein fachdidaktischer Modellbegriff ausgehend vom alltäglichen Verständnis von Modellen, z.B. in Form von Spielzeugautos als Modelle für Originalautos, entwickelt, der sich an der Konzeption von Kircher (2015, frühere Auflage) orientiert. Es gibt ein klares Original-Modell-Verhältnis in Form einer Analogie sowie ein Abbildungs- und ein Verkürzungsmerkmal. Ein Modell ist ein Konstrukt, das von einem Subjekt für einen bestimmten Zweck geschaffen wird. Dieser Zweck besteht darin, etwas bildlich oder gegenständlich zu veranschaulichen, Strukturen zu vereinfachen oder beobachtete Phänomene zu erklären, komplexe Zusammenhänge zu erforschen, Prognosen zu erstellen und Theorien zu bilden. Es wird darüber hinaus zwischen einer Erfahrungswelt und einer konstruierten Modellwelt unterschieden.

Ähnlich zu Kircher (2015) werden Modelle anhand ihrer Erscheinungsformen voneinander unterschieden. Kritisch ist ferner die Zweiteilung in eine „Erfahrungswelt“ und eine „Modellwelt“ (S. 5) zu betrachten, da Modelle durchaus auf Basis von Beobachtungen bzw. Erfahrungen erstellt werden können und sich (im Sinne der Autorin) wieder in gegenständlicher Form manifestieren, womit sie auch Teil der Erfahrungswelt sind bzw. sein können. Nach Passmore (2015) gibt es eine Diskrepanz zwischen dem unterrichtlichen und wissenschaftlichen Verständnis von Modellen. Die Entwicklung des Modellbegriffs ausgehend von einem alltäglichen Verständnis⁴ führt zu einer Fokussierung auf formale Merkmale der (externen) Repräsentationen und damit wie bei Kircher (2015) zu einer Unterscheidung zwischen gegenständlichen und theoretischen Modellen, die, wie oben beschrieben, nicht haltbar ist. Diese Fokussierung auf formale Merkmale von Modellen wird in verschiedenen jüngeren Diskussionen von Modellen im Lehr-Lern-Zusammenhang kritisiert (siehe dafür z.B. Adúriz-Bravo, 2013; Passmore et al., 2014).

Zusammenfassung der Modellkonzeptionen: Im Rückblick auf die vorgestellten Ansätze können verschiedene Ausgangspunkte für Rahmenkonzepte von Modellen erkannt werden. Wird eine Kohärenz

⁴Für eine Diskussion der Bedeutungen des Begriffs *Modell* im alltäglichen und im wissenschaftlichen Gebrauch siehe z.B. Adúriz-Bravo (2013).

zwischen Modellen in Lehr-Lern-Situationen und wissenschaftlichen Modellen angestrebt, ist die Perspektive von Passmore et al. (2014) besonders geeignet, weil sie wissenschaftliche Modelle aus einer praxisorientierten Sichtweise detailliert in ihre Konzeption einbindet. Implizite Konzeptionen in Form von Typologien und Klassifizierungen (Erduran & Duschl, 2004; Harrison & Treagust, 2000) sind nicht in der Lage, die Beziehung zwischen Modellen, Phänomenen und Theorien zu erfassen, den Werkzeugcharakter von Modellen angemessen herauszustellen und die vielfältigen Erscheinungsformen sinnvoll zu strukturieren. Die hier genannten expliziten Konzeptionen bieten hinsichtlich dieser drei Eigenschaften eine solidere Basis für eine Erschließung des Modellbegriffs, sind jedoch teilweise nicht konkret genug (J. K. Gilbert, 2004) oder erfassen zentrale Merkmale nur partiell (Kircher, 2015; Mikelskis-Seifert, 2010). Der Ansatz von Passmore et al. (2014) bietet die größten Ressourcen für eine Entwicklung eines Modellbegriffs. Kircher liefert einen interessanten Ansatz für die strukturelle Beschreibung von Erklärungen und Prognosen vor dem Hintergrund eines entsprechenden Modellbegriffs. Weitere naturwissenschaftsdidaktische Modellkonzeptionen für die Biologie (z.B. Upmeyer zu Belzen & Krüger, 2010) oder Chemie (z.B. Justi & Gilbert, 2003) sollen hier nicht aufgeführt werden, ihre Eignung und ihre Defizite können aber vor dem Hintergrund der oben genannten wesensprägenden Eigenschaften von Modellen analog untersucht werden.

Auf Basis dieser Ausgangslage und der oben genannten Eigenschaften soll ein tragfähiges Rahmenkonzept gebildet werden, das elementare Merkmale, Funktionen und Darstellungsweisen von Modellen berücksichtigt. Dafür wird ein Modellbegriff, aufbauend auf die Konzeption von Passmore et al. (2014), entwickelt und begründet. Im Anschluss soll gezeigt werden, wie aus diesem Begriff eine Visualisierung von Modellen und des Modellierens hervorgehen und eine Unterscheidung von Modellen beschrieben werden kann. Ein konkretes Beispiel verdeutlicht den entwickelten Begriff. Im Hinblick auf ein zu entwickelndes Verfahren für die Untersuchung von Modellen vor dem skizzierten Hintergrund müssen Erklärungen, Vorhersagen etc. in eine Konzeption eingebettet werden. Dieses Bestreben kann in folgendem Entwicklungsziel zusammengefasst werden.

2.2 ZIEL DER ENTWICKLUNG

Entwickelt werden soll ein tragfähiges Rahmenkonzept, das ein elementarisiertes und mit der wissenschaftlichen Praxis kohärentes Bild von Modellen für naturwissenschaftliche Lehr-Lern-Situationen anbietet. Der Begriff der Erklärung soll in dieses Bild eingeordnet werden.

2.3 BESCHREIBUNG DER ENTWICKLUNG

In der naturwissenschaftlichen Fachdidaktik wird vermehrt der Ansatz vertreten, edukative Erkenntnisprozesse möglichst authentisch zu gestalten. Dies soll zwar nicht in dem Sinne geschehen, dass hochkomplexe wissenschaftliche Experimentiersituationen und Theoriegebäude in Lehr-Lern-Situationen abgebildet werden, sondern indem ein elementares Verständnis davon aufgebaut wird, wie die Na-

turwissenschaften prinzipiell erfolgreich Wissen über die Natur gewinnen können (Chinn & Malhotra, 2002) und gewonnen haben, und welche kulturellen und kognitiven Ressourcen dabei wie eingesetzt werden und wurden (vgl. u.a. J. K. Gilbert, 2004; Lemke, 1998; Passmore, 2015). In einer solchen Sichtweise ist eine gewisse elementare Kohärenz von Modellen in der Wissenschaft und in Lehr-Lern-Situationen wünschenswert, und zwar hinsichtlich der Art, wie Modelle konstruiert, verwendet und dargestellt werden. Ausgehend von der Konzeption von Passmore et al. (2014) werden die drei dort als zentral beschriebenen Merkmale nun weiter ausgeleuchtet und der Modellbegriff daraufhin präzisiert.

Eine wesensprägende Eigenschaft von Modellen ist ihre Stellung zwischen Phänomenen und Theorien und die Beziehungen zu diesen beiden Domänen. Nach J. K. Gilbert (2004) funktionieren Modelle als Brücke zwischen der wissenschaftlichen Theorie und der Realität bzw. „world-as-experienced“ (S. 116) oder nach Passmore (2015) „between the more abstract and very general theoretical ideas in a field and the empirical world“ (S. 660), wobei darauf hingewiesen werden muss, dass es auch Theorien gibt (z.B. makroskopische Thermodynamik oder Grenzschichttheorie bei Flüssigkeiten), die in hohem Maße empirisch überprüfbare Aussagen machen und observable Elemente enthalten können und somit nicht zwangsläufig der empirischen Welt gegenüber stehen. Ein Modell beinhaltet Entitäten und Beziehungen, die zu dem, worauf sich das Modell bezieht, in einem bestimmten Verhältnis stehen. Die Art dieses Verhältnisses bzw. der *Repräsentation* wurde und wird viel diskutiert: Giere (1988) bezeichnet diese Beziehung als Ähnlichkeit, Hesse (1966) als Analogie⁵. Der Begriff der *Repräsentation* wird dabei in unterschiedlichen Kontexten unterschiedlich verwendet. Im wörtlichen Sinne verwendet bedeutet er, etwas zu *re*-präsentieren, also als reales Objekt (Bild, Gegenstand etc.) erneut zu vergegenwärtigen. In Bezug auf Modelle bedeutet *repräsentieren* jedoch, für etwas anderes zu stehen (Knuuttila, 2005), wodurch Modelle auch als abstrakte Entitäten verstanden werden können (Giere, 1988). Deshalb soll im Folgenden zwischen Repräsentationen in diesem allgemeinen (abstrakten) Sinn und *externen*, also realen, physischen Repräsentationen unterschieden werden.

Morrison (1999) bezeichnet Modelle als partielle Ausschnitte von Phänomenen und Theorien, die aufgrund ihrer vielfältigen Erscheinungsformen nicht einer bestimmten, dominierenden Repräsentationsbeziehung, sondern mehreren möglichen Beziehungsarten unterworfen sind, z.B. in Form einer Isomorphie, Analogie oder Ähnlichkeit (vgl. dazu auch Passmore et al., 2014). Sie repräsentieren zwar Ausschnitte des Phänomens und der Theorie, jedoch nicht das gesamte Phänomen oder die gesamte Theorie, was eingeschränkt durch das Verkürzungsmerkmal in Kircher (2015) erfasst wird, wobei sich dessen Verkürzungsmerkmal eher einseitig auf die Verkürzung der Realität durch ein Modell bezieht. Modelle können sogar gewisse *fremde* Elemente enthalten, die weder dem untersuchten Phänomen noch der betroffenen Theorie entstammen (Morgan & Morrison, 1999; Suárez, 1999). Verschiedene Modelle können, je nach Zweck, unterschiedliche Ausschnitte bzw. Elemente eines Phänomens (respektive einer Theorie) erfassen (vgl. Begriff des Phänomens als „patchwork of models“ in Passmore et al., 2014).

⁵Für eine Übersicht über verschiedene Ansätze der Wissensrepräsentation in Modellen siehe u.a. Adúriz-Bravo (2013), Frigg und Hartmann (2017), Knuuttila (2005) sowie Morrison (1999).

Zur Präzisierung der Beziehung von Modellen zu Phänomenen und Theorien ist es hilfreich, die Begriffe *Phänomen* und *Theorie* ebenfalls festzulegen. Demnach soll als Phänomen ein in der realen Welt und unter einem bestimmten Blickwinkel erkannter Ausschnitt bezeichnet werden, oder, in den Worten Gilberts, die „world-as-experienced“. Demgegenüber steht die Theorie als etablierter Wissenskorpus, wobei eine erkenntnistheoretische Ausarbeitung des Phänomen- und Theoriebegriffs hier nicht diskutiert werden soll⁶, sondern die genannte Beschreibung im Sinne einer Elementarisierung als hinreichende Charakterisierung betrachtet werden kann. Aus dieser Festlegung geht jedoch hervor, dass sowohl Phänomene als auch Theorien die Subjekte (Individuen oder Gruppen von Menschen) einbeziehen und sich sowohl Phänomene als auch Theorien und damit auch Modelle auf der Ebene des Subjekts voneinander unterscheiden, nämlich beispielsweise dadurch, wie komplex die jeweiligen Ausschnitte des Phänomens und des etablierten Wissens sind (siehe auch Unterabschnitt *Eine Charakterisierung von Modellen auf der Ebene des Subjekts* in diesem Kapitel). Es sind also Subjekte mit einem spezifischen Erkenntnisinteresse, die die Phänomene erkennen, die Theorien aufbauen bzw. nutzen und entsprechend Modelle dafür erstellen.



Abbildung 2.1: Teller mit scheinbar unterschiedlicher Lage in einem Spülbecken

Exemplarisch kann die Beziehung von Modellen zu Phänomenen und Theorien am Beispiel des Phänomens von scheinbar gehobenen Gegenständen unter Wasser illustriert werden (z.B. wie in Abb. 2.1). Ein Modell zur Erklärung dieses Phänomens wird unter anderem die (tastbare und scheinbare) Lage der Gegenstände einbeziehen, die beteiligten Stoffe Wasser bzw. Luft und den Beobachter als Ausschnitte des Phänomens sowie Licht als Strahlen, die Brechungsindizes der beteiligten Medien und ein Lot auf der Grenzfläche zwischen den Medien als Ausschnitte der Theorie der Optik. Weitere Elemente des gesamten Phänomens wie die konkrete Form des Gegenstandes, seine Farbe, die Temperatur des Wassers sowie andere Elemente der Optik wie z.B. elektromagnetische Wellen oder die Dispersionsrela-

⁶Für eine Übersicht über die Entwicklung des Theoriebegriffs in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts siehe z.B. Suppe (2000) und im Zusammenhang mit Modellen Frigg (2006). Für eine Diskussion des Phänomenbegriffs siehe z.B. Müller (2017)

tion werden für diese Erklärung nicht in ein Modell einbezogen werden. Zusammenfassend wird damit die Beschreibung von Passmore et al. (2014, S. 1176f.) “Models are partial renderings of phenomena“ wie folgt erweitert:

1. *Modelle repräsentieren partielle Ausschnitte von Phänomenen und Theorien und vermitteln so zwischen diesen beiden Domänen.*

Die Eigenschaft, Elemente von Phänomenen und Theorien zu repräsentieren, genügt nicht, um Modelle als wissenschaftliche Werkzeuge zu verstehen, denn sie sind weniger dadurch charakterisiert, woraus sie bestehen, sondern vielmehr dadurch, wie sie eingesetzt und konstruiert werden. Ihre konkrete Beschaffenheit und ihre Merkmale werden derart optimiert, dass sie ihrem angedachten Zweck bestmöglich dienen. Im übertragenen Kontext wird beispielsweise ein Bohrer als Werkzeug vordergründig dadurch gekennzeichnet, dass er Löcher in einem Objekt bohrt, unabhängig von seiner konkreten Form oder Beschaffenheit. Aber: seine Form und Beschaffenheit ist für das spezielle Einsatzgebiet des Bohrers angepasst, weswegen sich Holzbohrer von Betonbohrern unterscheiden und diese wiederum anders beschaffen sind als etwa Tunnelbohrer. Oder, wie Teller (2001) schreibt: Es gibt keine inhärenten Eigenschaften, die irgendetwas zu einem Modell machen, sondern dieses etwas wird erst durch seinen Gebrauch zu einem Modell:

„The point is that when people demand a general account of models, an account which will tell us when something is a model, their demand can be heard as a demand for those intrinsic features of an object which make it a model. But there are no such features. WE make something into a model by determining to use it to represent. Once this is fully appreciated it becomes clear that we can get on with the project on the strength of a good supply of clear cases of things which are used to represent. These will adequately support study the variety of such uses, the way they function in the scientific enterprise, their interrelations, and so on“ (S.397, Hervorhebung im Original).

In den Naturwissenschaften sind Modelle als Werkzeuge dadurch gekennzeichnet, spezifische Aussagen über ein bestimmtes natürliches oder technisches Phänomen zu machen. So schreiben Passmore et al. (2014, S. 1176): „A globe, for example, is not a model of the Earth by default. It becomes a model when it is used to make sense of some puzzling pattern or answer some question. The same object can both be a model and not be a model depending on how it is being used.“ Modelle sind damit nicht Modelle *von* etwas, sondern *für* etwas, nämlich für einen bestimmten erkenntnisorientierten Zweck (Passmore et al., 2014). Diese Funktion als wissenschaftliche Werkzeuge können Modelle ausüben, weil sie autonome Gebilde, also teilweise unabhängig von Phänomenen und etablierten Theorien, sind. Sie repräsentieren eben nur bestimmte Aspekte des jeweiligen Phänomens und der Theorie. Das macht sie flexibel.

In Bezug auf das oben genannte Beispiel kann ein Modell zur Erklärung von scheinbar gehobenen Gegenständen ohne größere Veränderungen auch benutzt werden, wenn sich statt eines Gegenstandes,

der vollständig unter Wasser ist, ein Bleistift im Wasser befindet und, wenn er dort heraus ragt, geknickt erscheint. Dieses Modell ist also unabhängig davon, um was für einen Gegenstand es sich handelt, ob es mehrere Gegenstände sind, ob sie aus dem Wasser herausragen, ob die beteiligten Stoffe verändert werden, der Beobachter seinen Einblickwinkel auf den Gegenstand verändert usw., sodass das Modell ohne Einbezug der jeweils vollständigen Theorie verändert und dem konkreten Zweck angepasst werden kann. Und schließlich erlauben Modelle so auch Idealisierungen, Näherungen und Abstraktionen.

Modelle können also wie beschrieben als Werkzeuge für bestimmte wissenschaftliche Zwecke verwendet werden, etwa zur Exploration und Strukturierung von Phänomenen, zum Aufstellen und Weiterentwickeln einer Theorie, zur Erklärung eines Phänomens mit Hilfe einer Theorie oder zur Vorhersage auf Basis einer Theorie. Je nach Zweck ändert sich die Auswahl und Verknüpfung der Ausschnitte von Phänomen und Theorie, die in dem Modell repräsentiert werden. Beispielsweise kann im Fall der Theoriebildung ein Ausschnitt der Theorie noch unterbestimmt sein, d.h., dass das auf einem bestimmten Gebiet etablierte Wissen nicht ausreicht, um ein vorliegendes Phänomen erklären zu können. So fehlt gegenwärtig etwa eine entsprechend vollständige Theorie, um das Phänomen des *Confinement* in der Teilchenphysik erklären zu können.

Umgekehrt ist im Fall einer theoriebasierten Vorhersage ein Teil der Phänomenstruktur noch unbekannt und muss in einem experimentellen Rahmen überprüft werden, wie an dem historischen Beispiel Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie illustriert werden kann, die unter anderem aussagt, dass Licht durch große Massen abgelenkt werden würde. Diese Aussage hat zur Folge, dass sich die scheinbare Position von Sternen verändert, wenn ihr Licht auf dem Weg zur Erde massereiche Objekte wie etwa die Sonne passieren muss. Das vorhergesagte Phänomen war zu dem Zeitpunkt, als Einstein seine Theorie veröffentlichte, noch nicht erschlossen. Die Vorhersage konnte erst auf einer Expedition am 29.5.1919 während einer totalen Sonnenfinsternis bestätigt werden. In diesem Fall war Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie dann in der Lage, das beobachtete Phänomen zu erklären. Ein Modell ist demzufolge dann Grundlage einer Erklärung, wenn, wie bei Kircher (2015) angedeutet, darin die Ausschnitte des Phänomens und der einer geeigneten Theorie widerspruchsfrei in Beziehung zueinander gesetzt werden können. Andernfalls handelt es sich um eine Vorhersage, eine Theoriebildung, eine Phänomenexploration usw. Damit folgt in Anlehnung an Passmore et al. (2014, S. 1176f.):

2. Modelle sind als autonome, wissenschaftliche Werkzeuge durch den Kontext ihrer zweckgerichteten, teilweise unabhängigen Konstruktion und Verwendung definiert.

Ihre Flexibilität und Funktionalität als wissenschaftliche Werkzeuge erhalten Modelle wie soeben beschrieben durch ihre teilweise Unabhängigkeit von Theorien und Phänomenen, aber eben auch durch die Unabhängigkeit von ihrer konkreten Darstellungsform. So, wie es in Bezug auf ein Phänomen für verschiedene Zwecke unterschiedliche Modelle geben kann, gibt es für jedes Modell unterschiedliche externe Repräsentationsformen, die ebenfalls verschiedenen Zwecken dienen. Diese Externalisierung ist notwendig, um Modelle im wissenschaftlichen Diskurs etablieren, überprüfen und verändern zu können. Die Repräsentationsformen bzw. der jeweilige *Modus* (engl.: mode) werden an verschiede-

nen Stellen unterschiedlich typisiert: Nach J. K. Gilbert (2004) sind diese Modi etwa materiell, verbal, symbolisch, visuell, gestisch; für Airey und Linder (2009) sind Repräsentationen in Form von Bildern, Apparaten, gesprochener und geschriebener Sprache, mathematischen Darstellungen, Gesten usw. gegeben. Jeder Modus hat einen eigenen Angebotscharakter. Das heißt, dass durch eine bestimmte Darstellungsweise bestimmte Eigenschaften übertragen werden und andere nicht (vgl. Fredlund, Linder, Airey & Linder, 2014; Van Heuvelen, 1991). Aber „es ist eben nicht die Darstellungsweise, die etwas zu einem Modell macht; vielmehr ist es die Art, wie die dem Modell zugrundeliegenden Ideen für das Ziel der (naturwissenschaftlichen) Erkenntnisgewinnung benutzt werden, die ein Modell definieren“ (Passmore, 2015, S. 660, Übers. d. Verf.). Jedoch, Pädagogen und Lehrbuchautoren „neigen dazu, die repräsentationale Form selbst als Modell zu bezeichnen“ (Passmore et al., 2014, S. 1180, Übers. d. Verf.). Eine Fokussierung auf Merkmale der Darstellung in Lehr-Lern-Situationen kann jedoch dazu führen, dass der Blick auf Modelle als Werkzeuge für naturwissenschaftliche Aussagen über Phänomene verstellt wird (Passmore et al., 2014).

Aus der Unterscheidung zwischen Modellen und ihren Darstellungen folgt, dass es beim Modellieren zum einen Entscheidungen gibt, die in Bezug auf die Konstruktion oder Anwendung eines Modells getroffen werden, z.B. welche Elemente einbezogen und welche Beziehungen zwischen diesen Elementen betrachtet werden, und zum anderen solche Entscheidungen, die die Darstellungsweise betreffen. Das bedeutet einerseits, dass ein Modell nicht auf (eine) seine(r) Darstellungsformen reduziert werden kann, und andererseits, dass bestimmte Merkmale beispielsweise in Abbildungen zu Erklärungen von Phänomenen auftreten, die gar nicht Teil des Modells sind, wie beispielsweise die Farbe von Protonen und Elektronen in Darstellungen des Atoms. Das Modellieren ist in gewisser Weise ein reduktiver Prozess: Wissenschaftler versuchen, nur die relevanten Ausschnitte von Phänomenen und Theorien in das Modell einzubeziehen, während für das Externalisieren des Modells wieder Merkmale hinzugenommen werden müssen. Zusammengefasst wird hier diese Eigenschaft von Passmore et al. (2014) übernommen:

3. „*Modelle sind von ihren externen Darstellungen verschieden*“ (Passmore et al., 2014, S. 1176, Übers. d. Verf.).

Durch die Formulierungen 1.-3. werden Modelle durch die eingangs genannten Eigenschaften nicht nur beschrieben, sondern sie konstituieren sich aus ihnen. Die erste Eigenschaft, der Ausschnittcharakter, sagt etwas darüber aus, was Modelle beinhalten, die zweite Eigenschaft stellt eine Konstitution von Modellen durch ihre Verwendung dar und die dritte Eigenschaft ist eine Beschreibung durch Abgrenzung von Modellen gegenüber ihren externen Darstellungen. Aus dieser Beschreibung geht auch hervor, was unter dem Vorgang des Modellierens verstanden werden kann. Der Prozess des Modellierens besteht demnach darin, Elemente auszuwählen und in Beziehung zueinander zu setzen, die für einen bestimmten Zweck relevant erscheinen (Morgan & Morrison, 1999; Passmore, 2015), gegebenenfalls zu überprüfen, anzupassen und in geeigneter Form darzustellen. Knuuttila (2005) beschreibt Modellieren in Einklang mit der obigen Ausführung bestehend aus zwei Leveln des Repräsentierens: Ein

Level beinhaltet die Entscheidung, das auszuwählen, was von einem System relevant für ein Modell ist, das zweite Level beinhaltet die Entscheidung darüber, wie die relevanten Attribute dargestellt werden sollen. Dabei bedingen und beeinflussen sich diese Entscheidungen gegenseitig und in komplexer Art und Weise (siehe dazu auch Chi, Feltovich & Glaser, 1981; J. K. Gilbert, 2005; Larkin, McDermott, Simon & Simon, 1980).

2.4 ERGEBNISSE UND IMPLIKATIONEN

Auf Basis dieser Ausführungen können nun die Begriffe des Modells, des Modellierens und exemplarisch der (sprachlichen) Erklärung in Bezug auf diesen Modellbegriff festgelegt werden. Die Festlegung von Begriffen wie beispielsweise der bildlichen Erklärung oder einer sprachlichen Prognose etc. erfolgt analog. Die Auswahl der sprachlichen Erklärung als eine Form der Darstellung eines Modells für einen bestimmten Zweck geschieht im Hinblick auf die Instrumententwicklung und empirische Untersuchung in den nächsten Kapiteln. Die Festlegungen stellen keine allgemein gültigen Definitionen dar, sondern sind aus physikdidaktischer Sicht pragmatische Formulierungen auf der Basis der obigen Ausführungen.

2.4.1 Festlegungen

Festlegung „Modell“: In einem Modell werden von einer Person oder einer Gruppe von Personen relevante Ausschnitte, d.h. Elemente und Beziehungen eines Phänomens, einer Theorie und ggf. aus weiteren Domänen für einen bestimmten wissenschaftlichen Zweck repräsentiert, wobei ein Modell von seinen unterschiedlichen Darstellungsformen verschieden ist.

Festlegung „Modellieren“: Modellieren ist der Prozess der Konstruktion, Revision und Anwendung von Modellen, bei dem für einen bestimmten wissenschaftlichen Zweck relevante Elemente des Phänomens und der Theorie ausgewählt, in Beziehung zueinander gesetzt und dargestellt werden.

Festlegung „(sprachliche) Erklärung“: Die (sprachliche) Erklärung eines Phänomens ist die (sprachliche) Darstellung eines Modells, in dem die relevanten Elemente des Phänomens und der betroffenen Theorie(n) ausgewählt und in fachlich korrekte Beziehungen zueinander gesetzt werden.

2.4.2 Visualisierung des Modellbegriffs und des Modellierens

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich eine mögliche bildliche Darstellung des Modellbegriffs. Diese bildliche Darstellung bzw. das zugrundeliegende ‘Modell’ ist die Grundlage für die Entwicklung eines entsprechenden Untersuchungsverfahrens im nächsten Kapitel. Anhand der bildlichen Darstellung einer Erklärung zum Phänomen von scheinbar gehobenen Objekten kann exemplarisch gezeigt werden, wie diese Visualisierung konkret umgesetzt werden kann. Eine validierte Form dieser Umsetzung für sprachliche Erklärungen ist Gegenstand dieser Entwicklung im nächsten Kapitel. Zuvor jedoch soll

noch erläutert werden, wie mit Hilfe des hier entwickelten Modellkonzepts eine Unterscheidung von Modellen auf der Ebene des Subjekts möglich ist und damit auch, wie beispielsweise wissenschaftliche und mentale Modelle gemäß Passmore et al. (2014) und J. K. Gilbert (2004) zueinander in Beziehung stehen.

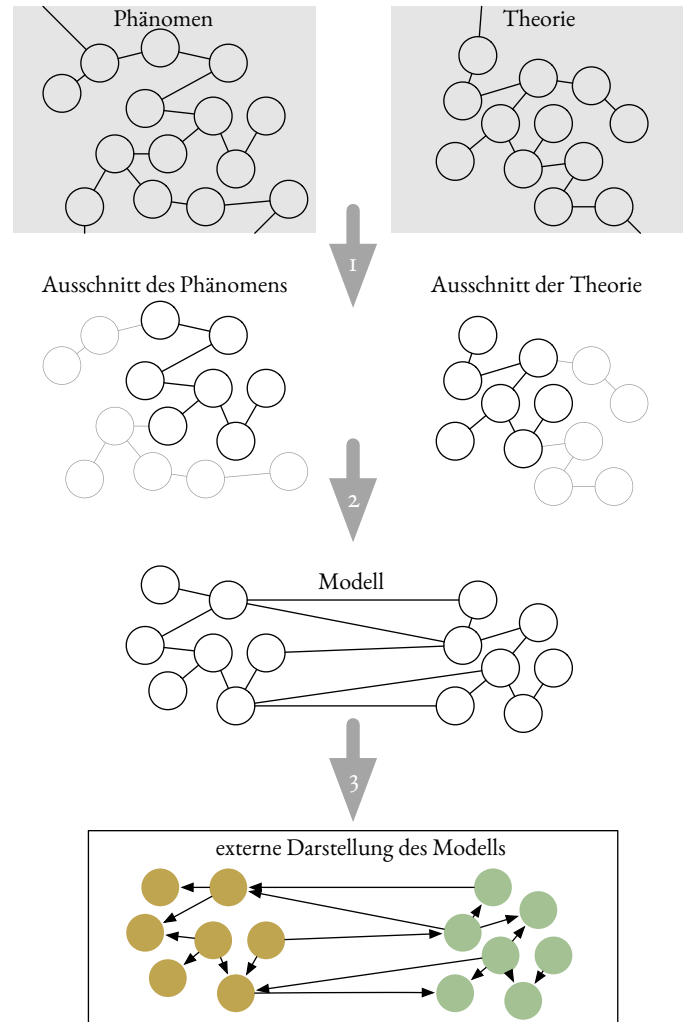


Abbildung 2.2: Visualisierung des Modellbegriffs und des Modellierens in einer schematischen Darstellung durch Kreise (Elemente) und Pfeile (Beziehungen)

Mit der Abbildung 2.2 wird eine symbolische, visuelle, schematische Darstellung des im Vorangegangenen beschriebenen Modellbegriffs und des Modellierens vorgeschlagen. In der obersten Reihe sind die Domänen *Phänomen* und *Theorie* als graue Kästchen mit einer inhärenten Struktur, bestehend aus bestimmten Elementen (Kreise) und Beziehungen zwischen diesen Elementen (gerade Verbindungslinien), abgebildet. Die Tatsache, dass in dieser Abbildung Elemente und Beziehungen sowohl im Phänomen als auch in der Theorie als Kreise und gerade Verbindungen dargestellt sind, soll

nicht bedeuten, dass die Elemente und Beziehungen von Phänomenen und Theorien von der gleichen Art sind. Vielmehr soll diese Darstellungsweise verdeutlichen, dass es in Bezug auf die Realität und die Theorie überhaupt von einer Person oder Gruppe von Personen erkannte Entitäten (Elemente, Objekte, Eigenschaften usw.) sowie Beziehungen dazwischen gibt. Die Verbindungslinien zum Rand des jeweiligen Kästchens symbolisieren, dass das Phänomen und die Theorie nicht als isolierte Struktur verstanden werden soll.

Der oberste graue Pfeil (1) stellt einen Schritt des Modellierens in Einklang mit Knuuttila (2005) sowie Morgan und Morrison (1999) dar: Aus dem Phänomen und der Theorie werden von einer Person oder einer Gruppe von Personen bestimmte Elemente und Beziehungen dazwischen für einen bestimmten Zweck ausgewählt. Diese Auswahlen sind in der zweitobersten Reihe dunkel umrandet, während der (nicht ausgewählte) Rest blasser dargestellt ist. Dabei sind für verschiedene Modelle, die zu unterschiedlichen Zwecken konstruiert werden, bezüglich dieser Ausschnitte des Phänomens und der Theorie in Einklang mit Passmore et al. (2014) auch andere ausgewählte Elemente und Beziehungen denkbar.

Der mittlere graue Pfeil (2) repräsentiert den Prozess des Verknüpfens der entsprechenden Ausschnitte des Phänomens und der Theorie und damit das Erstellen eines Modells. Dieses Modell ist in der zweituntersten Reihe der Abbildung 2.2 dargestellt: Es handelt sich gemäß der oben getroffenen Festlegung um von einer Person oder einer Gruppe von Personen ausgewählte Ausschnitte von Elementen und Beziehungen des Phänomens und der Theorie, die zueinander für einen bestimmten Zweck in Beziehung gesetzt werden.

Der untere graue Pfeil (3) steht für die Externalisierung des Modells zum Zweck der Kommunikation. Die Tatsache, dass in der untersten Reihe die Elemente farbig und die Verbindungen mit Pfeilen dargestellt sind, soll verdeutlichen, dass für die externe Darstellung des Modells Eigenschaften hinzukommen, die durch die Darstellungsweise bedingt sind. Es handelt sich hierbei konkret um die Darstellung eines Modells im Rahmen einer Erklärung, da die entsprechenden Ausschnitte des Phänomens und der Theorie alle verifiziert und miteinander verbunden sind. Die Darstellung kann multimodal erfolgen. Diese Ebene der externen Darstellungen ist also diejenige, mit deren Hilfe in Fachzeitschriften, Lehrbüchern und im Klassenraum kommuniziert wird, wobei diese Ebene eben nicht gleichzusetzen ist mit der Ebene des Modells selbst. Das Phänomen befindet sich nicht in einer dieser Darstellungen, sondern ist ein Ausschnitt der Realität.

In der Abbildung 2.2 ist das Subjekt, also der Modellierer nicht explizit dargestellt, aber implizit in allen Teilen der Abbildung präsent: in der obersten Reihe handelt es sich um die von Menschen erkannten Strukturen in der Realität und in der Theorie, in der zweitobersten Reihe um die von Menschen ausgewählten Ausschnitte davon, in der zweituntersten Reihe um den von Menschen erkannten Zusammenhang dazwischen und in der untersten Reihe um die von Menschen erstellten externen Darstellungen. Die Linearität der Abfolge durch die Pfeile $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ erhebt nicht den Anspruch, einen linearen Prozess abzubilden. Vielmehr können diese Schritte in vielfältiger Weise als zergliedert und miteinander verwoben betrachtet werden.

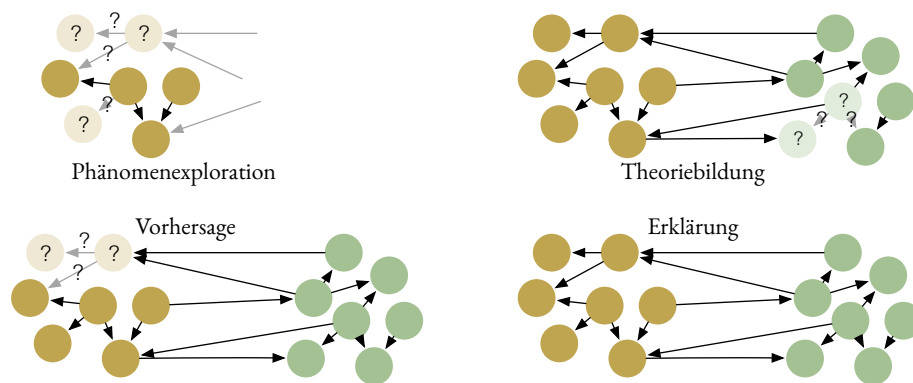


Abbildung 2.3: Visualisierung von Modellen zu verschiedenen ausgewählten Zwecken

Mit der Abbildung 2.3 soll die in Abbildung 2.2 vorgeschlagene Darstellungsweise benutzt werden, um Modelle für verschiedene wissenschaftliche (und edukative) Zwecke zu kennzeichnen. Oben links wird der Prozess der Phänomenexploration dargestellt, bei dem der entsprechende Ausschnitt der Realität einer Strukturierung unterworfen wird. Unten links ist die Darstellung eines Modells zur Vorhersage von Teilen des Phänomens auf Basis einer Theorie abgebildet, oben rechts die Darstellung eines Modells zur Entwicklung einer Theorie auf der Basis von Beobachtungen und unten rechts die Darstellung eines Modells zur Erklärung eines Phänomens durch eine Theorie. Diese Verteilung wird in realen wissenschaftlichen Erkenntnisprozessen nicht trennscharf vorgenommen werden können und bildet auch nicht alle möglichen wissenschaftlichen Erkenntnisprozesse ab, kann jedoch in Anlehnung an Morgan und Morrison (1999) aus einer wissenschaftstheoretischen bzw. an J. K. Gilbert (2004), Kircher (2015) und Passmore et al. (2014) aus der Perspektive des naturwissenschaftlichen Lernens einige Wesenszüge wissenschaftlicher Erkenntnisprozesse abbilden und somit eine eingangs geforderte Kohärenz herstellen.

2.4.3 Eine Charakterisierung von Modellen auf der Ebene des Subjekts

Ein Großteil der Typen oder Klassen von Modellen in den Konzeptionen von Erduran und Duschl (2004), Harrison und Treagust (2000), J. K. Gilbert (2004) und Kircher (2015) fallen durch die Unterscheidung von Modellen und ihren externen Darstellungen weg: enaktive, ikonische, symbolische, skalierte und gegenständliche Modelle gibt es nicht. Dies sind unterschiedliche *Modi* der Darstellung, die in wissenschaftlichen Publikationen, in Lehrbüchern oder im Klassenraum zudem auch oft in hybrider Form auftauchen, etwa als beschriftete Skizzen - also ikonische Darstellungen mit zusätzlichen symbolischen Zeichen. Wobei auch hierbei die genannte Klassifizierung zu hinterfragen ist, denn: Ist die bildliche Darstellung eines Lichtstrahls nun ein Symbol oder ein Ikon, wenn es Lichtstrahlen als physische Objekte gar nicht gibt (Hecht, 2009)? Unabhängig davon können Modelle zum einen hinsichtlich ihres Zwecks bzw. Werkzeugcharakters unterschieden werden, wie in der Benennung von Modellen für Erklärungen, Vorhersagen, Phänomenexplorationen oder Theoriebildungen angedeutet wurde. Eine

weitere Unterscheidung von Modellen kann auf der Ebene des Subjekts vorgenommen werden, welches ein Modell konstruiert oder verwendet. Diese Charakterisierung spiegelt sich beispielsweise in der Benennung von *scientific models*, *teaching* bzw. *curricular models* und *mental models* bei J. K. Gilbert (2004) wieder. Darin unterscheiden sich die Modelle vor allem hinsichtlich der Komplexität der betrachteten Phänomen- und beteiligten Theorieausschnitte sowie gegebenenfalls der Komplexität der externen Darstellungsformen.

wissenschaftliche Modelle: Solche Modelle repräsentieren Elemente etablierter Theorien und komplexer Phänomene, die Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen sind. Sie werden zum Zweck der Exploration dieser Phänomene, zur gezielten (Weiter-)Entwicklung von Theorien, zum Erstellen präziser Vorhersagen und angemessener Erklärungen erstellt (Morgan & Morrison, 1999). In der Regel werden sie in der wissenschaftlichen Gemeinschaft in Fachzeitschriften, auf Konferenzen oder auf entsprechenden Plattformen in Form von Beiträgen kommuniziert, die Texte, Formeln, Diagramme, Skizzen und Fotos als externe Darstellungen des jeweiligen Modells beinhalten. Modelle, deren Entwicklung bereits länger zurück liegt, die jedoch in ihrer wissenschaftsgeschichtlichen Einordnung eine bedeutende Rolle gespielt haben und noch immer spielen, werden als *historische Modelle* bezeichnet, wie zum Beispiel das Bohrsche Atommodell. Auch sie repräsentieren Aspekte eines früher untersuchten Phänomens und der zu diesem Zeitpunkt etablierten Theorien; sie dienten den genannten wissenschaftlichen Zwecken und wurden durch verschiedene externe Repräsentationen auf den entsprechenden Plattformen (Zeitschriften, Kongressen etc.) kommuniziert. Wissenschaftliche und historische Modelle werden damit wie bei J. K. Gilbert (2004) charakterisiert.

Lehr-Lern-Modelle: Modelle, die in Lehr-Lern-Situationen im naturwissenschaftlichen Bereich eingesetzt werden, sind ebenfalls durch die drei genannten Eigenschaften gekennzeichnet. Die repräsentierten Ausschnitte der Phänomene und Theorien sind jedoch weniger komplex und das Erkenntnisinteresse bezieht sich nicht (vordergründig) auf den Stand der Forschung in dem jeweiligen Gebiet, sondern auf den für die Zielgruppe erwarteten Wissensstand. Das heißt, dass die ausgewählten Ausschnitte von Phänomenen und Theorien weniger bzw. andere Elemente und Beziehungen zwischen den Elementen enthalten als wissenschaftliche Modelle (Passmore et al., 2014). Aber auch Lehr-Lern-Modelle dienen dazu, Phänomene zu erschließen, das theoretische Wissen zu erweitern, Hypothesen zu überprüfen und geeignete Erklärungen zu finden. Solche Lehr-Lern-Modelle sind gewissermaßen vereinfachte Versionen wissenschaftlicher Modelle (J. K. Gilbert, 2004). Sie werden im Klassenraum, in Lehrbüchern oder auf anderen Plattformen ebenfalls durch verschiedene externe Repräsentationen kommuniziert, die jedoch oft (aber nicht immer!) ebenfalls weniger komplex sind als Darstellungen innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft.

persönliche bzw. mentale Modelle von Lernenden: Auf individueller Ebene ist ein Modell eine individuelle Repräsentation (Johnson-Laird, 1983), die sich dynamisch und spontan in spezifischen Situa-

tionen verändert (Vosniadou, 1994), auch und vor allem in Lehr-Lern-Situationen (siehe z.B. Coll & Treagust, 2003). Dabei erstellt ein Individuum in einer Situation auf Basis einer Beobachtung und vor dem Hintergrund seines erworbenen Wissens oft unbewusst eine interne, gedankliche Repräsentation, mit der versucht wird, die Beobachtung mit diesem erlernten Wissen in Einklang zu bringen - also ebenfalls Ausschnitte eines Phänomens und des persönlichen, etablierten Wissens als Entsprechung zur Theorie auf individueller Ebene miteinander zu verbinden. Auch hierbei dient das Modell einem bestimmten Zweck, z.B. dem des Verstehens im Sinne des *'Sich-selbst-erklären-könnens'* und es wird anderen Personen durch verschiedene externe Darstellungen zugänglich gemacht (verbal, visuell, gestisch usw.). In diesem persönlichen Zweck unterscheiden sich persönliche Modelle von Lernenden klar von wissenschaftlichen Modellen. Darüber hinaus sind sowohl das etablierte Wissen als auch die zur Verfügung stehenden Fähigkeiten zur Externalisierung in der Regel in verschiedenen Alltagskontexten und Lehr-Lern-Situationen erworben worden und daher individuell verschieden. Das beobachtete bzw. erkannte Phänomen wird in der Regel eine aus dieser individuellen Perspektive weitaus reichhaltigere Gesamtstruktur haben, als etwa für die Erklärung eines Phänomens aus einer bestimmten Perspektive erforderlich ist. Dadurch wird die besondere Rolle der Phänomenexploration und -strukturierung aus einer wissenschaftlich(-er)en Sichtweise deutlich, durch die sich die Komplexität des Phänomens verschiebt (bzw. sogar erhöht).

Damit können Modelle auf der Ebene des Subjekts und in dem Kontext, in dem sie benutzt werden, auf Basis des zuvor entwickelten Modellbegriffs charakterisiert werden. Auch die Beziehung zwischen diesen drei Formen von Modellen wird dabei deutlich. Wissenschaftliche Modelle werden von Wissenschaftlern konstruiert und verwendet und dienen einem wissenschaftlichen Zweck. Mentale Modelle werden in dem hier skizzierten Verständnis von Lernenden erstellt. Auch Wissenschaftler erstellen und benutzen mentale Modelle.

Im Sinne einer angestrebten Kohärenz zwischen der Verwendung von Modellen in der Wissenschaft und in Lehr-Lern-Situationen wird die Bedeutung von Lehr-Lern-Modellen deutlich: Ihnen kommt eine Brückenfunktion zwischen wissenschaftlichen Modellen und den mentalen Modellen der Physiklernenden zu. Diese Brückenfunktion können Lehr-Lern-Modelle in allen drei genannten, zentralen Eigenschaften ausüben, nämlich indem sie als Brücke auf der Ebene der Ausschnitte von Phänomenen und Theorien wirken, auf der Ebene der zweckgerichteten Verwendung von Modellen als wissenschaftliche Werkzeuge und auf der Ebene der externen Darstellung von Modellen. In der ersten dieser drei Funktionen bedeutet das, dass sie zum einen die von den Lernenden erkannten Phänomenstrukturen und die aus wissenschaftlicher Sicht relevanten Phänomenstrukturen erfassen und miteinander verbinden müssen und zum anderen das individuelle Wissen bzw. die individuellen (Schüler-)Vorstellungen berücksichtigen und in Richtung einer fachlich angemessenen Form entwickeln.

Auf der Ebene der zweckgerichteten Verwendung von Modellen kommt Lehr-Lern-Modellen die Brückenfunktion dadurch zu, dass sie Wege aufzeigen, wie wissenschaftliche Modelle im Prinzip zuverlässig und stabil beispielsweise Vorhersagen und Erklärungen liefern, wie mit ihrer Hilfe Phänomene erkundet oder theoretische Zusammenhänge etabliert werden können. Dabei haben z.B. Experimente

in Lehr-Lern-Situationen eine Bedeutung, die genau diese Brückenfunktion besonders berücksichtigt. So zeigen Hoettecke und Rieß (2015) überblicksartig verschiedene Experimentalstrategien, die sich in das hier entwickelte Modellkonzept einbetten lassen, und zwar in zweifacher Hinsicht. So werden zum einen Experimenten aus einer wissenschaftshistorischen bzw. -theoretischen Perspektive wichtige Rollen beispielsweise bei der Phänomenexploration, beim Testen von Vorhersagen oder bei der Theoriebildung zugeschrieben. Zum anderen fordern die Autoren ähnlich wie in dieser Arbeit eine gewisse prinzipielle Kohärenz zwischen naturwissenschaftlichem und unterrichtlichem Vorgehen - nur eben bezogen auf Experimente.

Und schließlich bedeutet die Brückenfunktion von Lehr-Lern-Modellen auf der Ebene der Unterscheidung von Modellen und ihren Darstellungen, aufzuzeigen, wie Modelle unterschiedlich dargestellt werden können, welche Eigenschaften die verschiedenen Darstellungen besitzen, oder etwa wie mit Hilfe von Darstellungen wiederum Modelle für einen bestimmten Zweck konstruiert oder modifiziert werden können. So zeigt etwa Boczianowski (2011) die Bedeutung von Pfeilen als grafische Elemente in verschiedenen unterrichtlichen und Anwendungssituationen in der Mechanik, beispielsweise in Modellen zur Überprüfung der Tragfähigkeit von Brückenkonstruktionen. Aber Pfeile sind dabei keine Modelle, sondern Visualisierungen bestimmter Elemente aus Modellen für unterschiedliche Zwecke.

2.4.4 Beispiel: Bildliche Darstellung eines Modells zur Erklärung der scheinbar verkürzten Beine einer Person im Wasser

Im Folgenden sollen Modelle und ihre genannten Eigenschaften anhand eines visuellen Beispiels, nämlich einer Skizze zur Erklärung eines Phänomens, erläutert werden. In dieser Skizze werden die Elemente besser sichtbar, weil es sich bei einer Skizze eben um eine *visuelle* Darstellung handelt. Eine Übertragung auf sprachliche Darstellungen ist dagegen aufgrund der abstrakten und nicht-ikonischen Struktur von Sprache und ihrer Sequenzierung nicht direkt möglich. Ein Verfahren, mit dem Modelle aus sprachlichen Erklärungen extrahiert und dargestellt werden können, wird im nächsten Kapitel entwickelt.

Abbildung 2.4 ist eine externe, bildliche Repräsentation eines Lehr-Lern-Modells zur Erklärung aus dem Phänomenkomplex der optischen Hebung. Dieser Phänomenkomplex beinhaltet Phänomene wie scheinbar gehobene Münzen in einem Brunnen, die scheinbare Stauchung der Tiefe und Verformung von Schwimmbecken bei schrägem Einblick oder scheinbare Verkürzung von Beinen bei Personen, die im Wasser stehen. Solche Phänomene werden vor dem Hintergrund der klassischen Optik (Bildoptik, geometrische Optik) erklärt (siehe unter anderem Nassar, 1994; Quick, Grebe-Ellis & Pason, 2015). Diese bildliche Darstellung wird hier als Beispiel gewählt, weil dadurch die vorgeschlagene Struktur (Ausschnitte des Phänomens und der Theorie sowie Beziehungen dazwischen) unmittelbarer sichtbar wird. Das vorgeschlagene Rahmenkonzept mit den drei genannten Eigenschaften soll anhand der bildlichen Darstellung exemplarisch illustriert werden. Das heißt konkret: Welche Ausschnitte des

Phänomens und der Theorie werden hier dargestellt und in Beziehung zueinander gesetzt? Welchen Zweck hat das zugrundeliegende Modell? Und: Wie unterscheiden sich hierbei dieses Modell und seine bildliche Darstellung voneinander und welche anderen Darstellungsweisen bieten sich an?

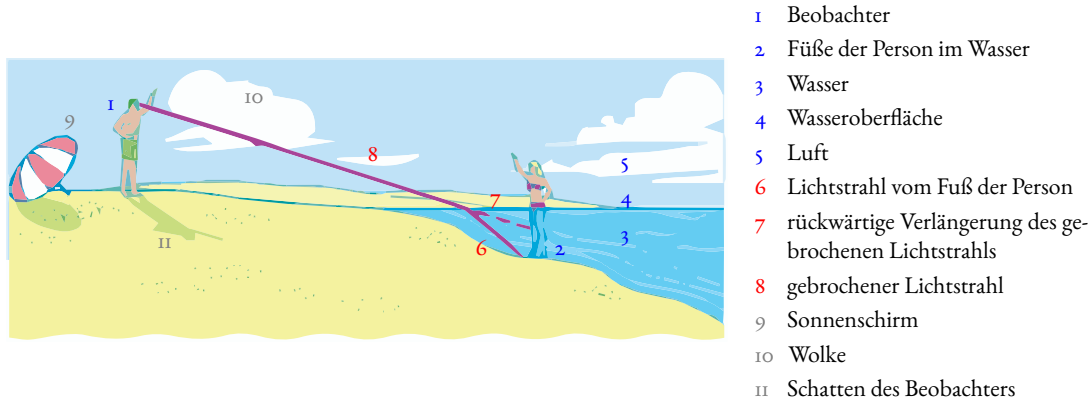


Abbildung 2.4: Abbildung zur Erklärung des Phänomens von scheinbar verkürzten Beinen einer Person im Wasser, nachgezeichnet nach Giancoli (2010, S. 1101)

Modelle als partielle Ausschnitte zwischen Phänomenen und Theorien: Die in dem Bild gekennzeichneten Elemente 1-5 stellen Ausschnitte des Phänomens dar, 6-8 Ausschnitte der Theorie und 9-11 Elemente in der Abbildung, die keine Bedeutung für eine Erklärung des gezeigten Phänomens haben, also nicht relevant sind. Durch die bildliche Darstellung werden vor allem bestimmte räumliche Beziehungen zwischen diesen Elementen sichtbar, wenngleich auch nicht alle (aufgrund des zweidimensionalen Charakters und der gewählten Perspektive).

Modelle als zweckorientierte, autonome, wissenschaftliche Werkzeuge: Die gezeigte bildliche Darstellung dient dazu, das Phänomen von scheinbar verkürzten Beinen einer Person im Wasser mit Hilfe von Lichtstrahlen zu erklären. In der vorliegenden Quelle (Giancoli, 2010) werden zuvor Lichtstrahlen im Rahmen der geometrischen Optik sowie deren Verhalten an Grenzflächen etabliert, um im Anschluss aufzuzeigen, welche beobachtbaren Phänomene damit erklärt werden können. Damit wird der Werkzeugcharakter des Modells illustriert.

Modelle als von ihren Darstellungen verschiedene Gebilde: In dem vorliegenden Fall handelt es sich um eine bildliche Darstellung in Form einer Skizze, bei der die Situation aus einer seitlichen Perspektive skizziert wird. Der Vorteil dieser Perspektive ist die Möglichkeit, im Rahmen der geometrischen Optik Lichtstrahlen einzeichnen zu können. Eine andere denkbare bildliche Darstellung wäre ein Foto aus der Perspektive des Beobachters, das dem wahrnehmbaren Phänomen näher kommt, in das sich jedoch keine Strahlen zur Erklärung des Phänomens einzeichnen lassen. Beide Möglichkeiten der bildlichen Darstellung haben also gewissermaßen einen anderen Angebotscharakter (Fredlund et al., 2014) und andere Defizite. Anhand der Abbildung wird einerseits die Verschiedenheit von Modellen und ihren externen Darstellungen deutlich und andererseits die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Darstellungsweisen. Tatsächlich erklärt die hier vorliegende Abbildung nämlich nur, dass die Füße der

Person *relativ über* ihrer tatsächlichen Position erscheinen, nicht jedoch, ob sie dem Betrachter entgegengerückt oder weiter von ihm entfernt gesehen werden. In der Abbildung 2.4 ist die scheinbare Lage der Füße über der tastbaren Lage und vom Betrachter ein Stück weggerückt, denn die rückwärtige Verlängerung des Lichtstrahls (Element 7 in Abb. 2.4) führt etwas weiter als bis zu einem gedachten Lot über der Fußspitze, von der der Lichtstrahl (6) zum Beobachter (1) ausgeht. Diese Verortung des Bildes der Füße ist damit falsch. Dieser Umstand ist jedoch keine Eigenschaft des zugrundeliegenden Modells, sondern der Darstellung: Der Bildautor hat sich entschlossen, nur einen Strahl einzuzichnen, der an der Wasseroberfläche gebrochen wird. Zur Bildkonstruktion werden jedoch üblicherweise mindestens zwei Strahlen verwendet. Die Bildkonstruktion mit Hilfe nur eines Strahls ist unterbestimmt. Darüber hinaus hat eine Darstellung dieser Art die Eigenschaft, beispielsweise die Wasseroberfläche als (idealisiert) zweidimensionales Objekt nur durch eine Linie zu kennzeichnen, wohingegen in einer sprachlichen Darstellung diese Einschränkung nicht stattfindet. Weiterhin wird in Abbildung 2.4 die tatsächliche, tastbare Lage der Füße wiedergegeben, die Beine der Person unter Wasser sind eingefärbt, Linien sind verstärkt usw. Dies alles sind Eigenschaften der Abbildung, nicht jedoch des Modells.

Der zuvor entwickelte Modellbegriff bietet damit einen Rahmen, innerhalb dessen beispielsweise bildliche Darstellungen aus einem Lehrbuch in Hinblick auf den Modellcharakter beleuchtet werden können. Prinzipiell können die jeweiligen Ausschnitte des Phänomens und der Theorie sowie Beziehungen dazwischen identifiziert werden, der Zweck und Werkzeugcharakter des Modells können klar erkannt werden und es wird bei Berücksichtigung des fachlichen, physikalischen Hintergrunds deutlich, welche Eigenschaften hier dem Modell und welche der Abbildung zugeschrieben werden müssen. Ein valides und präzises Verfahren zur Darstellung dieser Struktur anhand von sprachlichen Erklärungen wird im nächsten Kapitel „Instrumententwicklung“ vorgestellt.

2.4.5 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass bestehende fachdidaktische Modellkonzepte nicht oder nur unzureichend in der Lage sind, wesensprägende Eigenschaften von wissenschaftlichen Modellen zu erfassen. Dabei haben vor allem implizite Modellkonzeptionen in Form von Typologien und Kategorisierungen große Schwierigkeiten. Explizite Konzeptionen wie beispielsweise von J. K. Gilbert (2004), Kircher (2015) und Passmore et al. (2014) bieten dagegen mehr Anknüpfungspunkte für eine fachdidaktische Modellkonzeption. Dabei geht letztere explizit von einem wissenschaftlichen, praxisorientierten Modellbegriff aus und ermöglicht somit die Entwicklung eines authentischen (im Sinne von kohärenten) Bildes von Modellen in naturwissenschaftlichen Kontexten und in Lehr-Lern-Situationen, während Konzeptionen, die vom alltäglichen Modellbegriff ausgehen, zu einer Fokussierung auf Merkmale der Darstellung führen. Die Konzeption von Passmore et al. (2014) dient daher als Orientierungspunkt, von dem aus die darin beschriebenen Merkmale von Modellen weiter konkretisiert werden können. Modelle sind demnach partielle Ausschnitte von Phänomenen und Theorien, die als autonome, wissenschaftliche Werkzeuge durch den Kontext ihrer Verwendung definiert und von ihren ex-

ternen Darstellungen verschieden sind. Diese Konkretisierung führt beispielsweise zu einer bildlichen, schematischen Darstellung des Modellkonzepts, das Grundlage für eine Ausrichtung von Lehr-Lern-Situationen sowie von fachdidaktischer Forschung sein kann. Typische wissenschaftliche Vorgänge wie Vorhersagen, Erklärungen, Phänomenexplorationen oder Theorieentwicklungen lassen sich in dem Konzept und mit Hilfe dieser Visualisierung (siehe Abb. 2.2 und 2.3) beschreiben. Naturwissenschaftliche Lehr-Lern-Situationen wie z.B. das Experimentieren können unter Berücksichtigung eines Authentizitätsbegriffs im Sinne von prinzipieller Kohärenz zwischen naturwissenschaftlichem und curricularem Vorgehen anhand dieser Konzeption ausgerichtet werden. An einem Beispiel in Form einer bildlichen Darstellung zur Erklärung des Phänomens der optischen Hebung kann das Modellkonzept illustriert werden. Es lässt sich somit prinzipiell in solchen Darstellungen wiederfinden.

Wünschenswert ist nun ein Verfahren, das solche Darstellungen auch ausgehend von sprachlichem Material, das einen Großteil der Medien in Lehr-Lern-Situationen ausmacht, für den Zweck der Bewertung von Modellen zuverlässig und präzise erstellen kann. Eine solche Bewertung auf der Basis von konzeptuellen Kriterien muss dann im Vergleich mit etablierten Konzepten und Modellen geschehen (Passmore, 2015). Dabei sollen die Eigenschaften von Modellen, also namentlich ihr Ausschnitt- und Werkzeugcharakter sowie die Verschiedenheit von ihren Darstellungen explizit berücksichtigt werden.

Das bedeutet, dass ein derartiges Verfahren erstens auf die repräsentierten Elemente von Phänomenen und Theorien fokussiert, zweitens explizit einen Zweck (z.B. in Form einer Erklärung eines Phänomens) einbindet und drittens die Eigenschaften der repräsentationalen Form, in der das Modell dargestellt wird, berücksichtigt und von denen des zugrundeliegenden Modells unterscheidet. Die Entwicklung eines solchen Verfahrens wird im nächsten Kapitel dargestellt, die Anwendung dieses Verfahrens an einer größeren Stichprobe und deren Ergebnisse dann im übernächsten.

3 VERFAHRENTWICKLUNG

Inhalt des Kapitels

3.1	Ausgangslage	39
3.1.1	Concept Maps	39
3.1.2	Propositionale Netzwerke	41
3.1.3	Mind Maps	43
3.2	Ziel der Entwicklung	43
3.3	Beschreibung der Entwicklung	44
3.3.1	Identifikation und Darstellung der Elemente	44
3.3.2	Kategorisierung der Elemente	46
3.3.3	Identifikation und Darstellung der Beziehungen	48
3.3.4	Bewertung der Aussagen	51
3.4	Ergebnisse und Implikationen	54
3.4.1	Kodierummanual	54
3.4.2	Vorstudie	55
3.4.3	Zusammenfassung und Ausblick	58

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Modellbegriff konzipiert, der sich an der wissenschaftlichen Praxis orientiert. Danach repräsentieren Modelle relevante Ausschnitte bzw. Strukturen, also Elemente und Beziehungen, von Phänomenen und Theorien und ggf. Elemente weiterer Domänen, zum Beispiel benachbarter Theorien. Dabei kommen Modellen unter anderem die Funktionen von Erklärungen, Vorhersagen oder Phänomenexplorationen zu. Eine sprachliche Erklärung ist eine mündliche oder schriftliche Darstellung eines Modells, in dem relevante Ausschnitte des Phänomens und der Theorie miteinander und untereinander in fachlich korrekte Beziehungen gesetzt werden. Ein Verfahren zur Analyse einer solchen sprachlichen Erklärung muss in der Lage sein, 1. die Struktur (Elemente und Beziehungen) in sprachlichen Erklärungen zu identifizieren und zu visualisieren, 2. die jeweiligen Ausschnitte dem Phänomen und der Theorie zuzuordnen und zu entscheiden, ob diese für ein Modell zur

Erklärung relevant sind, und 3. die fachliche Korrektheit der Beziehungen zu beurteilen. Diese Merkmale müssen in dem entsprechenden Endprodukt des Verfahrens sichtbar werden.

Zunächst werden drei etablierte Formen von Netzwerken, die gewissermaßen Endprodukte eines solchen Verfahrens sein können, mit ihren Vor- und Nachteilen diskutiert, um daraus ein Ziel für die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens abzuleiten. Im Anschluss wird die Entwicklung des Verfahrens beschrieben. Das Ergebnis ist ein Kodiermanual (Anhang B). In einer Vorstudie wird dieses Kodiermanual an einer Stichprobe getestet, um die Güte des Verfahrens sowie Merkmale seines Endprodukts, nämlich *kategorienorientierte Concept Maps*, einzuschätzen.

3.1 AUSGANGSLAGE

Strukturvisualisierungen fachspezifischer Konzepte bzw. Begriffe, bestehend aus Elementen und Beziehungen zwischen den Elementen, können vor allem durch netzwerkartige Darstellungen realisiert werden, weil solche Netze erstens sichtbar sind und zweitens eben aus Elementen und Beziehungen bestehen. Drei etablierte Formen solcher Netzwerke sind namentlich Concept Maps, propositionale Netzwerke und Mind Maps. Ob und wie diese drei Formen potenziell in der Lage sind, die oben genannten Merkmale sichtbar zu machen, damit die Verwendung von Modellen in schriftsprachlichen Erklärungen untersucht werden kann, wird nachfolgend diskutiert.

3.1.1 Concept Maps

Concept Maps wurden im Rahmen naturwissenschaftlicher Lehr-Lern-Prozesse von Joseph D. Novak etabliert (siehe dazu z.B. Novak, 1990) und sind visuelle, netzwerkartige Darstellungen bestehend aus Konzepten (Elemente, *Knoten*) und Beziehungen (gerichtete Pfeile, *Kanten*) als Verbindungen zwischen diesen Konzepten. Eine Beziehung mit den dazugehörigen Konzepten bildet eine Aussage (Proposition) als kleinste Einheit, die wahr oder falsch sein kann:

„Concept maps, as we use the term, show the specific label (usually a word or two) for one concept in a node or box, with lines showing linking words that create a meaningful statement or proposition.“ Novak und Cañas (2006, S. 177)

Es sei an dieser Stelle unter Vorgriff auf die Beschreibung der Verfahrensentwicklung angemerkt, dass das Wort ‘Konzept’ auf verschiedenen semiotischen Ebenen unterschiedlich gebraucht wird. In Concept Maps ist ein Konzept ein Wort oder Begriff als linguistische Entität bestehend aus einem oder wenigen Wörtern (vgl. Zitat oben). In der Physikdidaktik wird der Begriff ‘Konzept’ jedoch eher als Stellvertreter für zentrale Ideen aufgefasst, die sich durch einen bestimmten Gebrauch, eine Bedeutung, Zusammensetzung und Relation zu anderen Ideen auszeichnet (vgl. u.a. J. K. Gilbert & Watts, 1983; Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982). Solche zentralen Ideen sind beispielsweise ‘Energie’, ‘Licht’ usw. Diese Begriffe sind in Concept Maps genauso als Elemente (Nodes) gekennzeichnet, wie

etwa die ‘kinetische Energie’ oder ‘Lichtgeschwindigkeit’, die in der Physikdidaktik eine viel spezifischere Bedeutung haben. Das Konzept in einem fachdidaktischen Sinn kann im Rahmen von Concept Maps somit als etablierte, bedeutungstragende Konstellation von Konzepten (als Elemente) und Beziehungen dazwischen verstanden werden.

Concept Maps unterscheiden sich teilweise stark voneinander (vgl. dazu z.B. Ahlberg, 2004; Jackson & Trochim, 2002), was vor allem auf ein unterschiedliches Verständnis davon zurückzuführen ist, was ein Konzept ist, welche Verbindungen zulässig sind und welche Struktur das Netzwerk haben soll. Für Novak und Cañas (2008, S. 1) ist ein Konzept „a perceived regularity in events or objects, or records of events or objects, designated by a label“. Danach sind Propositionen „statements about some object or event in the universe, either naturally occurring or constructed. Propositions contain two or more concepts connected using linking words or phrases to form a meaningful statement“. Für Ahlberg (2004) ist die Möglichkeit, solche auswertbaren Propositionen bilden zu können, zentrales Merkmal von Concept Maps. Die räumliche Struktur in Concept Maps kann einer Hierarchie folgen mit beispielsweise generelleren, inklusiveren Konzepten (z.B. ‘Energie’, ‘Licht’) oben und spezielleren, weniger inklusiven Konzepten (‘kinetische Energie’, ‘Lichtgeschwindigkeit’) unten (Novak & Cañas, 2008, Beispiele vom Verf. gewählt), es können jedoch auch Concept Maps ohne oder mit verschiedenen Hierarchien erstellt werden (Ahlberg, 2004). Kategorisierungen von Konzepten sind prinzipiell möglich (Carley & Palmquist, 1992). Die Evaluierbarkeit der Aussagen in Concept Maps bietet eine Möglichkeit der Bewertung von Textaussagen aus fachlicher Perspektive.

Die vielfältigen Erscheinungsformen und Einsatzgebiete von Concept Maps sind Vorteil und Nachteil zugleich. Die Vielfalt beruht auf der flexiblen Handhabung und Anpassungsfähigkeit von Concept Maps für verschiedene Zwecke. So können verschiedene Strukturen, die aus Elementen welcher Art auch immer und Beziehungen zwischen diesen Elementen bestehen und daraus geformte evaluierbare Aussagen bilden, prinzipiell als Concept Map dargestellt werden. Auch bieten sie unterschiedliche Analysemöglichkeiten unter qualitativen und quantitativen Gesichtspunkten. Aus der Vielfalt ergibt sich allerdings auch der nachteilige Umstand, dass es kein einheitliches, standardisiertes Verfahren für das Erstellen und auch keine standardisierten Einschätzungen bezüglich der Gütekriterien gibt (Ruiz-Primo & Shavelson, 1996), was etwa dazu führt, dass die Überprüfung der Gütekriterien für das Verfahren des Concept Mapping oft unzureichend ist (Graf, 2014).

Carley und Palmquist (1992) stellen eine Verbindung zwischen den individuellen (mental) Modellen und einem Netzwerk aus Konzepten her:

“(1) mental models are internal representations, (2) language is the key to understanding mental models, that is, mental models can be represented linguistically and those representations can be based on linguistic accounts, (3) mental models can be represented as networks of concepts, (4) the meaning of a concept for an individual is embedded in its relations to other concepts in the individual’s mental model ... “ (S. 602).

Mit dieser Verbindung und aufgrund der genannten Eigenschaften sind Concept Maps dazu geeignet,

Modelle aus Texten zu extrahieren und zu visualisieren. Sie können somit potenziell auch sprachliche Strukturen, die Dinge, Systeme, Eigenschaften und Prozesse als Elemente und Beziehungen dazwischen bezeichnen, erfassen. In der Abbildung B.1 ist der Satz „Eine Münze in einem Becken, das mit Wasser gefüllt ist, erscheint über ihrer tatsächlichen Position“ in Form einer Concept Map dargestellt. Darin bildet jeder Pfeil mit seinem Anfangs- und Ziel-Element und den entsprechenden Beschriftungen eine evaluierbare Aussage.

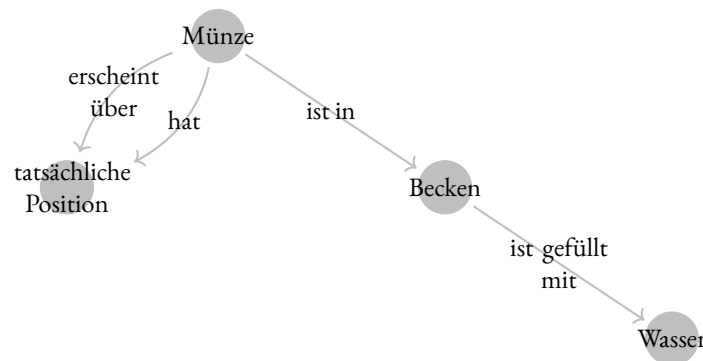


Abbildung 3.1: Concept Map zu dem Satz: „Eine Münze in einem Becken, das mit Wasser gefüllt ist, erscheint über ihrer tatsächlichen Position.“

Einschränkend muss festgehalten werden, dass Concept Maps im Bereich der Lehr-Lern-Forschung von Novak (1990) ursprünglich dafür entwickelt worden sind, um das Verständnis wissenschaftlicher Konzepte wie z.B. „*Energie*, *Molekül* oder *Evolution*“ (S. 938, übers. d. Verfassers) durch Lernende zu erfassen. Dabei standen vor allem Zusammenhänge zwischen den Konzepten und deren Hierarchien im Vordergrund, die sich in der Regel in einfachen Beziehungen ausdrücken lassen (z.B. „gehört zu“, „führt zu“). Die Vielfalt von Beziehungen in sprachlichem Material ist jedoch deutlich komplexer, etwa weil beispielsweise nicht nur Wörter, sondern ganze Aussagen in Beziehung zueinander gesetzt werden. Propositionen, die aus solchen übergreifenden Beziehungen gebildet werden, lassen sich durch eine einfache Form von Concept Maps nicht erfassen, sodass diese den entsprechenden Anforderungen angepasst werden müssen.

Eine Übersicht über die Verwendung von Concept Maps in physik- und chemiedidaktischen Kontexten bietet Fischler und Peuckert (2000). Darüber hinaus untersucht Weber (2003) den Einfluss vertikaler Vernetzung auf kumulative Lernprozesse beim Physiklernen. Härtig (2010) analysiert die Sachstruktur von Physikschulbüchern mit Hilfe von Concept Maps.

3.1.2 Propositionale Netzwerke

In der kognitiven Psychologie werden sprachliche Aussagen unter anderem als propositionale Netzwerke dargestellt (siehe z.B. Anderson, 2013), die ebenfalls aus Knoten und Verbindungen zwischen diesen Knoten bestehen und daraus evaluierbare Aussagen formen. In der Abbildung 3.2 ist der glei-

che Satz wie in Abbildung 3.1 als propositionales Netzwerk dargestellt. Im Gegensatz zu Concept Maps sind hier die Propositionen als graue Kreisflächen dargestellt. Eine Kreisfläche mit allen dazugehörigen Verbindungen bildet jeweils eine evaluierbare Aussage. Untersuchungen mit Hilfe solcher Netzwerke betreffen vor allem die propositionale Struktur des Gedächtnisses (Anderson, 2013).

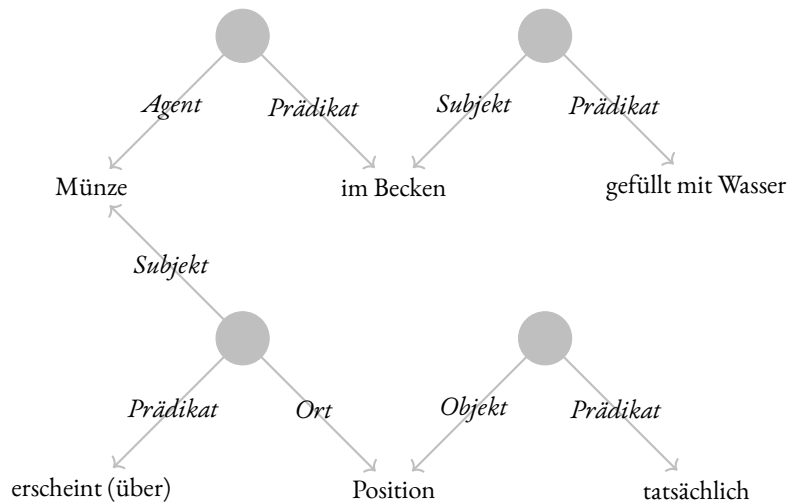


Abbildung 3.2: Propositionale Netzwerkdarstellung des Satzes: „Eine Münze in einem Becken, das mit Wasser gefüllt ist, erscheint über ihrer tatsächlichen Position.“

Ähnlich wie Concept Maps lassen sich Elemente propositionaler Netzwerke kategorisieren und somit prinzipiell Phänomenen oder Theorien zuordnen. Auch die Bewertung von Propositionen aus fachlicher Perspektive ist möglich. Jedoch erscheint die im Vergleich zu Concept Maps deutlich feinere Struktur dieser Netzwerke für den hier angedachten Zweck der Visualisierung von Modellen in sprachlichen Erklärungen unter einem ökonomischen Gesichtspunkt ungeeignet: Zum einen erfordert die Zuweisung von Satzbestandteilen zu Kategorien wie *Agent*, *Prädikat*, *Subjekt*, *Objekt* usw. durch zwei Beurteiler (für die Überprüfung der Beurteilerübereinstimmung) ein deutlich intensiveres Training und zum anderen visualisieren propositionale Netzwerke eben durch diese grammatikalischen Benennungen von Kategorien Informationen, die gar nicht benötigt werden. Der Vorteil propositionaler Netzwerke besteht allerdings darin, dass mit ihrer Hilfe auch komplexere sprachliche Strukturen wie z.B. Relativsätze und ganze, in Beziehung zueinander gesetzte Aussagen dargestellt werden können, wohingegen Concept Maps dementsprechend erst angepasst werden müssen.

Eine den propositionalen Netzwerken ähnliche Struktur haben Netzwerkdarstellungen auf Basis der „thematischen Analyse“ nach Lemke (1983), die Diskurselemente in Lehr-Lern-Kontexten (Erklärungen, Unterrichtsgespräche etc.) auf Basis linguistischer Methoden auflöst, womit ebenfalls ein für den Zweck dieser Arbeit unökonomisch hoher Informationsgehalt und Trainingsaufwand einherginge.

3.1.3 Mind Maps

Mind Maps sind wie Concept Maps visuelle, netzwerkartige Darstellungen zu einem zentralen Begriff, die aus Konzepten und Verbindungen in Assoziation zu diesem zentralen Begriff bestehen. Im Gegensatz zu Concept Maps entstehen Mind Maps eher assoziativ als strukturiert (Davies, 2011). Darüber hinaus bilden Konzepte und Verbindungen zwischen den Konzepten in Mind Maps keine auswertbaren Propositionen, weshalb sie eher in kreativen als in analytischen Zusammenhängen verwendet werden (Eppler, 2006). Eine mögliche Mind Map ist in Abbildung 3.3 im Vergleich zur Concept Map aus Abbildung 3.1 und zu einem propositionalen Netzwerk in Abbildung 3.2 dargestellt. Ohne die Möglichkeit zur Bewertung der fachlichen Korrektheit sind Mind Maps daher ungeeignet.

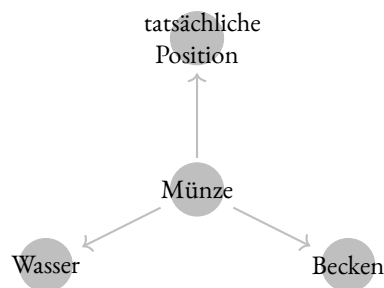


Abbildung 3.3: Mögliche Mind Map auf Basis des Satzes: „Eine Münze in einem Becken, das mit Wasser gefüllt ist, erscheint über ihrer tatsächlichen Position.“

Zusammenfassung. Im Vergleich der drei Darstellungsformen stellen sich Mind Maps als die einfachsten Visualisierungen heraus. Die Tatsache, dass sie keine auswertbaren Propositionen bilden, disqualifiziert sie für das angestrebte Ziel, Propositionen aus fachlicher Sicht bewerten zu können. Propositionale Netzwerke können solche Propositionen und auch sprachlich komplexere Strukturen abbilden, sind aber unter ökonomischen Gesichtspunkten ungeeignet. Concept Maps bieten eine geeignete Grundstruktur, die jedoch angepasst werden muss, um beispielsweise komplexere sprachliche Strukturen und inhärente Kategorien darstellen zu können. Daraus ergibt sich folgendes Entwicklungsziel.

3.2 ZIEL DER ENTWICKLUNG

Entwickelt werden soll von herkömmlichen Concept Maps ausgehend ein Verfahren, das die Strukturschriftsprachlicher Erklärungen vor dem Hintergrund des modellorientierten Rahmenkonzepts darstellt, damit die Verwendung von Modellen in solchen Erklärungen untersucht werden kann. Das heißt konkret, dass dieses Verfahren

- Elemente und Beziehungen in sprachlichen Erklärungen identifiziert und visualisiert,
- Elemente in die Kategorien des modellorientierten Rahmenkonzepts einordnet,
- Aussagen aus fachlicher Perspektive bewertet.

Ein Verfahren, das diese Forderungen erfüllt, ermöglicht es, die in sprachlichen Erklärungen dargestellten Modelle zu erfassen und dadurch zu bewerten und vergleichbar zu machen. Fachspezifische, konkrete und präzise Aussagen über den Umgang mit bzw. die Konstruktion von Modellen, über Ressourcen und Defizite im Umgang mit Phänomenen, im vorhandenen etablierten theoretischen Wissen sowie in der Verknüpfung zwischen Phänomenen und Theorien scheinen mit einem solchen Verfahren möglich zu sein.

3.3 BESCHREIBUNG DER ENTWICKLUNG

Die zuerst genannte Forderung für das Verfahren, nämlich die Visualisierung der Elemente und Beziehungen, wird von Concept Maps prinzipiell erfüllt. Damit eine Concept Map aus einer vorliegenden sprachlichen Erklärung erstellt werden kann, ist es notwendig, die Elemente und Beziehungen zunächst zu extrahieren. Die zweite und dritte Forderung sind zwei verschiedene Kategorienzuordnungen: zum einen die Zuordnung der Elemente zu den Bereichen *Phänomen* bzw. *Theorie* und die Entscheidung darüber, ob sie für ein Modell zur Erklärung *relevant* oder *nicht relevant* sind, und zum anderen die Bewertung der Aussagen als fachlich korrekt bzw. inkorrekt. Dabei werden zunächst die Elemente und dann die Beziehungen zwischen diesen Elementen sowie die daraus entstehenden Aussagen betrachtet:

1. Elemente identifizieren (und visualisieren)
2. Elemente als relevante oder nicht relevante Ausschnitte des Phänomens oder der Theorie kategorisieren (und Kategorisierung visualisieren)
3. Beziehungen zwischen den Elementen identifizieren (und visualisieren)
4. Aussagen als korrekt oder inkorrekt bewerten (und Bewertung visualisieren).

Diese Schritte wurden anhand sprachlichen Materials aus unterschiedlichen Quellen durch eigene Vorarbeiten im Zeitraum vom Winter 2013/2014 bis zum Sommer 2015 entwickelt und überarbeitet. Die zu erklärenden Phänomene stammen aus dem Phänomenkomplex der sogenannten *optischen Hebung*. Im Kodiermanual im Anhang B werden die Schritte anhand eines ausgewählten Beispiels in weitere, unter praktischen Gesichtspunkten notwendige Teilschritte untergliedert und durch konkrete Hinweise, Ausnahmen und Sonderfälle ergänzt. Nachfolgend werden die Hauptschritte begründet und dargestellt.

3.3.1 Identifikation und Darstellung der Elemente

Konzepte werden in Bezug auf das Lernen als „objects, events, situations, or properties“ definiert (Ausubel, 2000, S. 2). Auf diesem Verständnis basieren auch die Konzepte als Elemente von Concept Maps (Gurlitt, 2012). Dabei werden üblicherweise Konzepte direkt als Elemente des konzeptuellen Verständnisses aus dem Gedächtnis abgerufen. Im vorliegenden Fall sollen jedoch Konzepte in sprachlichen Erklärungen identifiziert werden. Die dafür notwendige Brücke wird von der Linguistik bereitgestellt.

Die *Semantik* als Teilgebiet der Linguistik untersucht den Zusammenhang von Wörtern und Sätzen und deren Bedeutungen (Pittner, 2016) bzw. den Bezug zur außersprachlichen Realität. Eine Visualisierungsmöglichkeit eines Modells für den Zusammenhang zwischen sprachlichen Ausdrücken und deren Bezugsobjekten über Konzepte ist in Abbildung 3.4 als ‘semiotisches Dreieck’ dargestellt. Darin ist die Variante im linken Teil der Abbildung angelehnt an die ursprüngliche Bezeichnungskonvention nach Ogden und Richards (1989) und die Variante im rechten Teil nach Pittner (2016) eine Übertragung von dieser Urform.

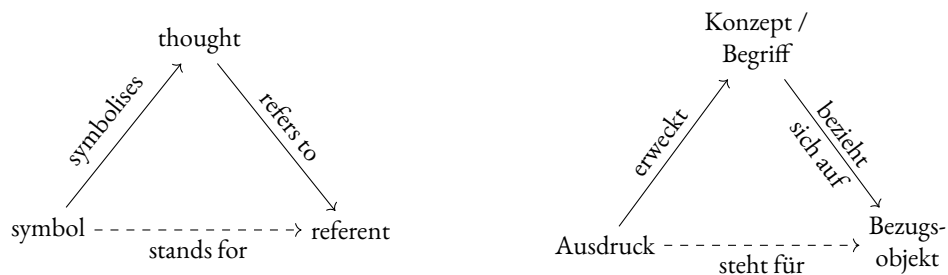


Abbildung 3.4: Semiotisches Dreieck. links: in der Darstellung nach Ogden und Richards (1989, S. 11), rechts: angelehnt an die Darstellung nach Pittner (2016, S. 125)

Im semiotischen Dreieck nach Pittner (2016) stellt der Ausdruck eine sprachliche Einheit dar, das Bezugsobjekt ein außersprachliches Element und ein Konzept einen kontextabhängigen Begriff. Dabei kann in Abhängigkeit vom jeweiligen Kontext ein Bezugsobjekt verschiedene Konzepte evozieren. An einem in diesem Zusammenhang häufig verwendeten Beispiel nach Frege (1892) wird dies deutlich: Der *Abendstern* und der *Morgenstern* sind zwei verschiedene sprachliche Ausdrücke verschiedener Konzepte für ein und dasselbe Bezugsobjekt, nämlich für die Venus als Himmelskörper. Das Konzept *Abendstern* steht für das hellste Objekt am Himmel nach Sonnenuntergang für einen gewissen Zeitraum des Jahres, das Konzept *Morgenstern* für das hellste Objekt am Himmel vor Sonnenaufgang für einen anderen Zeitraum des Jahres. Die beiden Konzepte werden dementsprechend durch unterschiedliche sprachliche Ausdrücke, nämlich *Abendstern* und *Morgenstern*, wiedergegeben. Der Zusammenhang kann wie bei Pittner (2016, S. 125) folgendermaßen formuliert werden: „Mit einem Ausdruck verknüpft sind mentale Konzepte (‘Begriffe’), über die ein Bezug zu Objekten und Ereignissen in der Realität hergestellt werden kann“. Ein Konzept wiederum kann im Allgemeinen durch verschiedene Ausdrücke wiedergegeben werden.

Zur klareren Unterscheidbarkeit von Konzepten als Elementen in Concept Maps und Konzepten als Stellvertreter für zentrale, fachspezifische Ideen sollen im Folgenden die Elemente der Concept Map als *Begriffe* bezeichnet werden und die fachspezifischen Ideen als *Konzepte* (wie z.B. das Strahlenkonzept der Optik). Dabei kann zwar ein Konzept als Begriff auftauchen, nicht jeder Begriff stellt in diesem Sinne jedoch ein Konzept dar. Beispielsweise gehören die Begriffe ‘gebrochener Strahl’, ‘einfallender Strahl’, ‘Lot’ usw. zum Konzept der ‘Strahlen’ in der Optik, jedoch werden ‘Strahlen’ auch wie

die zuvor genannten Begriffe als Elemente in Concept Maps visualisiert.

In sprachlichen Erklärungen sollen nun diese Begriffe identifiziert werden. Dies geschieht mit Hilfe der Betrachtung der *Syntax*, die die Regeln für die Kombination sprachlicher Ausdrücke beschreibt. Die Objekte, Ereignisse, Situationen, Eigenschaften, Prozesse, Systeme und Zustände, die durch Begriffe erfasst werden, entsprechen den Nomen bzw. Substantiven, die sprachlich als Gattungsnamen (z.B. Beobachter, Strand, Becken), als Stoffsubstantive (Wasser, Luft), als Bezeichnungen für Nicht-Gegenständliches (Licht) oder als Eigennamen (Snellius) usw. auftreten (Pittner, 2016, Beispiele vom Verf. gewählt). Dürscheid und Businger (2012) beschreiben Substantive als Bezeichnungen für Lebewesen, Dinge oder eben „Begriffe“ (S. 27). Alternativ können für Nomen in Texten stellvertretend *Pronomen* in unterschiedlichen Erscheinungsformen (Possessivpronomen, Demonstrativpronomen, usw.) auftauchen. Demonstrativpronomen wiederum können auch auf eine ganze Wortgruppe (Phrase) oder ganze Sätze verweisen bzw. stellvertretend dafür stehen, wie etwa in: „Licht ändert seine Ausbreitungsrichtung an bestimmten Grenzflächen. *Dieses* Verhalten bezeichnet man als Brechung“. Nomen können auch in Verbindung mit Adjektiven einen Begriff bilden, wie z.B. ‘gebrochener Strahl’.

Wenn verschiedene Wörter *synonym* verwendet werden, wird mit unterschiedlichen sprachlichen Ausdrücken der gleiche Begriff bezeichnet. Sie werden in Concept Maps durch ein Element als Stellvertreter dargestellt. Im Gegensatz dazu gibt es gleich lautende sprachliche Ausdrücke, die aber unterschiedliche Begriffe bezeichnen (*Homonymie*). Auf sprachliche Besonderheiten dieser Art muss bei der Identifikation der Elemente Rücksicht genommen werden. Im Kodiermanual ist die Identifikation der Elemente in Texten nach dem Lesen des Textes (erster Schritt) durch die Teilschritte 1. bis 5. beschrieben. Die Visualisierung erfolgt mit einem geeigneten Grafikprogramm.

3.3.2 Kategorisierung der Elemente

Gemäß der Festlegungen der Begriffe ‘Modell’, ‘Modellieren’ und ‘sprachliche Erklärung’ repräsentiert ein Modell relevante Elemente von Phänomenen und Theorien und Beziehungen dazwischen, wobei der Modellierungsprozess darin besteht, diese relevanten Elemente auszuwählen, zueinander in eine fachlich richtige Beziehung zu setzen und gegebenenfalls in einer sprachlichen Erklärung sprachlich darzustellen (siehe Abschnitt 2.4). Daraus folgt, dass für die Bewertung und den Vergleich in einer vorliegenden sprachlichen Erklärung die Elemente dahingehend geprüft werden sollen, ob sie einen Ausschnitt des Phänomens oder der Theorie darstellen und ob sie relevant für ein Modell zur Erklärung sind oder nicht. Diese zwei Entscheidungen ergeben damit vier Kategorien: (1 / *Ph-o*) Phänomen - nicht relevant, (2 / *Ph-M*) Phänomen - relevant, (3 / *Th-M*) Theorie - relevant, (4 / *Th-o*) Theorie - nicht relevant.

Wie können Elemente dahingehend unterschieden werden, ob sie einen Ausschnitt des Phänomens oder der Theorie darstellen, und ob sie relevant sind oder nicht? Diese Zuordnungen erfordern die Interpretation der Bedeutung von Elementen und somit ein entsprechendes fachliches Vorwissen in Bezug auf das Phänomen und die entsprechende Theorie. Die Zuordnungen sollen durch allge-

meine Kategorienbeschreibungen und spezifische Fallbeispiele auf Basis dieses fachlichen Vorwissens erfolgen.

Die Zuordnung zu den Bereichen Phänomen bzw. Theorie kann durch zwei Betrachtungsweisen unterstützt werden, und zwar zum einen auf der Ebene des Begriffs und zum anderen auf der Ebene des Bezugsobjekts, auf das sich der Begriff bezieht (siehe semiotisches Dreieck in Abb. 3.4). Ein sprachlicher Ausdruck wird in einem bestimmten Kontext als Begriff interpretiert und in einer Concept Map als Element dargestellt. Der Kontext ist die spezifische Verwendung des Elements. Nach dem Abschnitt 2.4.3 „Charakterisierung von Modellen auf der Ebene des Subjekts“ im vorangegangenen Kapitel entspricht die Domäne ‘Theorie’ auf der Ebene eines lernenden Subjekts dem durch Prozesse in fachspezifischen Lehr-Lern-Situationen erworbenen Wissen. Wenn also das Element vorwiegend im Kontext fachspezifischer Diskurse und in den entsprechenden Lernsituationen und tendenziell nicht in alltagssprachlich geprägten Diskursen verwendet wird, dann soll er dem Theoriebereich zugeordnet werden. Beispielsweise haben die Elemente „Wasseroberfläche“ und „Grenzfläche“ als mögliche Elemente von Erklärungen des Phänomens der scheinbaren Hebung das gleiche Bezugsobjekt, wobei das Element „Grenzfläche“ eher fachspezifischen Diskursen zugeordnet werden kann und „Wasseroberfläche“ auch in alltagssprachlich geprägten Diskursen auftaucht.

Eine zweite Betrachtungsweise erfolgt mit Hilfe einer Spezifizierung des Phänomenbegriffs. Eine solche Spezifizierung wird beispielsweise von Müller (2017) aufgeführt, der vier verschiedene grundlegende Auffassungen des Begriffs darlegt. Zwei dieser Auffassungen können für eine hier angestrebte Zuordnung hilfreich sein, nämlich Phänomene „als die Erscheinungen im Gegensatz zu den Theorien“ (S.14) und „als die Beziehung zwischen Ich und Welt“ (S. 14). Der ersten Auffassung entspricht beispielsweise auch die Auffassung von Phänomenen als „reality-as-observed“ bei J. K. Gilbert (2004, S. 116) im Modellkontext. Diese Auffassung beschreibt Phänomene also eher als prinzipiell objektiv beobachtbare Ausschnitte, während die zweite Auffassung Phänomene als in der Welt von einem Subjekt erkannte Ausschnitte benennt, also das erkennende Subjekt explizit einbindet. Das heißt für die angestrebte Zuordnung, dass ein Begriff, dessen Bezugsobjekt sich prinzipiell gar nicht erkennen lässt, auch nicht dem Phänomenbereich zugeordnet werden kann. Beispiele dafür sind fiktionale Entitäten wie etwa das *Lot* oder *Lichtstrahlen*.

Diese zuletzt genannte Betrachtung kann also eine Orientierung für den Ausschluss von Elementen aus der Phänomenkategorie auf Basis der Interpretation des Bezugsobjekts sein, während die erste Betrachtung eine Orientierung auf Basis der Interpretation des Begriffs für die noch nicht ausgeschlossenen Elemente liefert. Diese Betrachtungen haben nicht den Anspruch einer vollständigen epistemologischen Untermauerung, sondern sollen wie die Festlegungen der Begriffe *Modell*, *Modellieren* und *sprachliche Erklärungen* im vorangegangenen Kapitel als praktische Entscheidungshilfen angesehen werden. Die Güte und Konsistenz dieser Entscheidungen muss durch eine entsprechende Beurteilerübereinstimmung überprüft werden.

Auch die Zuordnung der Elemente zu den Kategorien ‘relevant’ bzw. ‘nicht relevant’ bedarf einer fachlichen Analyse und Kenntnis des Phänomenkomplexes. Eine allgemeine, kontext- und fachunab-

hängige Regel für diese Zuordnung kann daher nicht angegeben werden. Eine Orientierungshilfe ist jedoch die Einschätzung, ob ein Begriff in dem vorliegenden Kontext etabliert ist, oder beispielsweise einem anderen Phänomenbereich oder einem anderen theoretischen Konzept zugeordnet werden kann. So sind beispielsweise ‘Schatten’ (wie z.B. in Abbildung 2.4) zwar unter Umständen in der gesamten Struktur des Phänomens bei der optischen Hebung erkennbar, jedoch werden Schatten in einem anderen Kontext betrachtet und dementsprechend in Modellen für andere Erklärungen verwendet, etwa in einer Erklärung der Entstehung von hellen und dunklen Bereichen bei einer bestimmten Konstellation von Lichtquellen, Schattengebern und Projektionsflächen. Hier spiegelt sich auch ein Aspekt von Phänomenen nach Passmore et al. (2014) wider, nachdem Phänomene wie im Kapitel 2 beschrieben als „covered by a ‘patchwork’ of models“ (S. 1178, Hervorhebung im Original) bezeichnet werden. Das gleiche Prinzip kann für die Unterscheidung zwischen relevanten und nicht relevanten theoretischen Elementen angewendet werden. Die Erklärung der optischen Hebung erfolgt häufig im Rahmen der geometrischen Optik (vgl. Nassar, 1994), also im Konzept der Lichtstrahlen. Benachbarte Konzepte, wie das Wellen- oder Teilchenkonzept von Licht, haben sich dagegen für solche Phänomene nicht etabliert. Daher können Elemente wie *Wellenfronten*, *Photonen* usw. für die Erklärung von Phänomenen der scheinbaren optischen Hebung als nicht relevant betrachtet werden. Damit soll jedoch nicht ausgesagt werden, dass Lichtstrahlen ein notwendiges Element in Erklärungen dieses Phänomens sind.

Eine Beschreibung der vier entstehenden Kategorien mit einer Liste von Ankerbegriffen sowie eine kurze Zusammenfassung des zugrundeliegenden Entscheidungsverfahrens sind Teil des Kodiermanuale im Anhang B. Die Visualisierung erfolgt mit einem geeigneten Grafikprogramm. Die Unterscheidung von Elementen des Phänomens und der Theorie kann dabei durch eine unterschiedliche Farbgebung der Elemente in einer Concept Map erfolgen. Eine unterschiedliche Füllart dieser Knoten kann zur Unterscheidung von relevanten bzw. nicht relevanten Elementen erfolgen (siehe Abb. 3.5).

3.3.3 Identifikation und Darstellung der Beziehungen

Beziehungen oder *Kanten* werden in Concept Maps als beschriftete Pfeile zwischen Elementen dargestellt. Diese Beziehungen mit den durch sie verknüpften Konzepten bilden eine *Proposition* oder *Aussage*. Eine Proposition ist die kleinste evaluierbare Einheit einer Concept Map. Eine Beziehung eines Elements zu sich selbst wird als *Schleife* bezeichnet. Um Beziehungen in einer sprachlichen Erklärung aufzudecken, können die darin identifizierten Begriffe schrittweise dahingehend untersucht werden, ob sie durch Prädikate oder beispielsweise Adjektive zu anderen sprachlichen Ausdrücken syntaktisch in Verbindung stehen. Prädikate (Verben) setzen als grammatikalische Funktionen Subjekte und Objekte (Nomen, Pronomen) zueinander in Beziehung (Pittner, 2016). Adverbien oder adverbiale Bestimmungen beschreiben Subjekte, Objekte oder Prädikate näher. Nähere Beschreibungen können auch in Form von Schleifen dargestellt werden.

Nicht jede intendierte Beziehung muss dabei in der sprachlichen Struktur repräsentiert werden. Beispielsweise lauten die Beziehungen in den Sätzen „Licht wird an der Wasseroberfläche gebrochen.



Abbildung 3.5: Mögliche Visualisierung der vier Kategorien für die Elemente

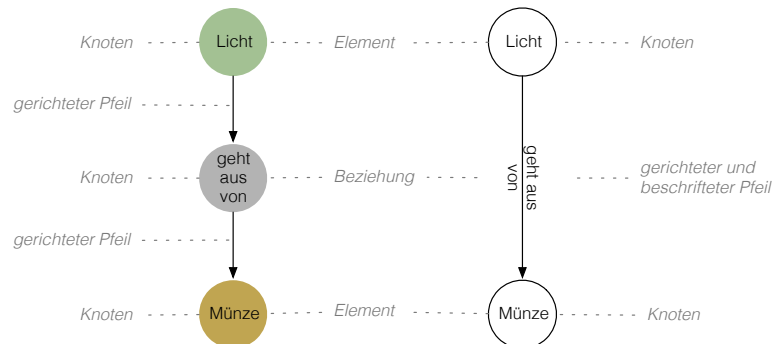


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung einer Proposition in einer modifizierten Concept Map (links) und einer herkömmlichen Concept Map (rechts)

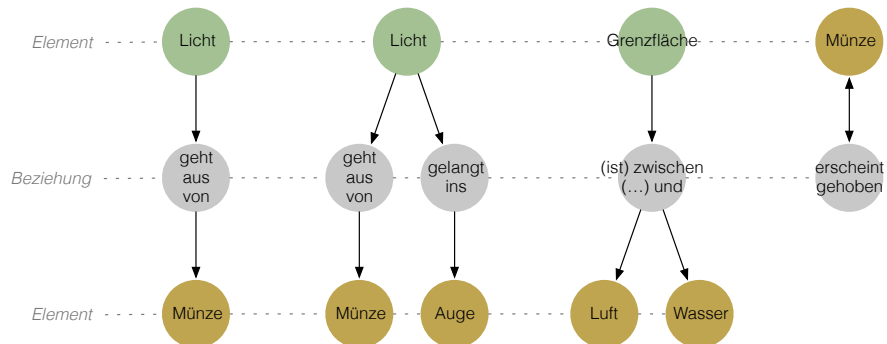


Abbildung 3.7: Verschiedene Konstellationen von Elementen und Beziehungen; links: Beziehung mit einer Quelle und einem Ziel (eine Proposition); Mitte links: zwei Beziehungen mit der gleichen Quelle, aber verschiedenen Zielen (zwei Propositionen); Mitte rechts: eine Beziehung von einer Quelle zu zwei Zielen (eine Proposition); rechts: Schleife (Beziehung eines Elements zu sich selbst, eine Proposition)

Brechung ist ein physikalischer Begriff“ wie folgt:

1. wird gebrochen an (Elemente: Licht, Wasseroberfläche)
2. ist (Elemente: Brechung, physikalischer Begriff).

Es stellt sich die Frage, ob diese beiden Sätze auch zueinander in Beziehung stehen. In dem vorliegenden Fall wird diese Beziehung dadurch hergestellt, dass das Element „Brechung“ aus dem zweiten Satz eine Substantivierung der Beziehung „wird gebrochen an“ aus dem ersten Satz ist und somit eine Beziehung zwischen einer Beziehung und einem Element darstellt. Dadurch sind beide Sätze miteinander verbunden. Wird der erste Satz jedoch leicht verändert zu „Licht wird an der Wasseroberfläche geknickt“ und der zweite Satz in seiner Form beibehalten, so kann aufgrund der syntaktischen Struktur keine Beziehung mehr hergestellt werden, obwohl beide Varianten das Gleiche aussagen. Hier ist das Herstellen einer Beziehung zwischen den beiden Sätzen nur durch das Erschließen der semantischen Bedeutung möglich. Indikatoren für satzübergreifende Beziehungen sind beispielsweise lokale oder kausale Adverbien (*hier*, *darum*), Konjunktionen (*dadurch*) oder Demonstrativpronomen (*dieser*).

Vor allem die Forderung, nicht nur Beziehungen zwischen Begriffen sondern auch zwischen Aussagen herstellen zu können, erzwingt eine strukturelle Modifikation herkömmlicher Concept Maps. Üblicherweise werden darin Beziehungen als beschriftete Pfeile zwischen Konzepten dargestellt und Konzepte als kreisförmige Knoten. Diese Knoten sind entweder Quelle (bzw. *Source*) am Pfeilanzug oder Ziel (bzw. *Target*) am Pfeilende. Wenn jedoch auch ganze Aussagen als Quellen oder Ziele anderer Beziehungen auftreten können, dann erscheint es ratsam, auch die Beziehungen (einer Proposition) als Knoten darzustellen, diese jedoch von den Begriffen auf eine andere Art zu unterscheiden, beispielsweise durch die Form oder Farbe. Somit wird gewissermaßen ein Vorteil propositionaler Netzwerke in Concept Maps eingeflochten. Damit kann nun von einer Beziehung (in einer Proposition) ein gerichteter Pfeil zu einer anderen Beziehung oder zu einem anderen Element erstellt werden. Somit können auch Aussagen miteinander verbunden werden. Ein Nebeneffekt dieser Konvention besteht darin, in analytischen Verfahren auch Beziehungen Zentralitätsmaße zuweisen zu können, was in herkömmlichen Concept Maps allein den Begriffen vorbehalten ist. Für eine Visualisierung soll hier die Übereinkunft getroffen werden, Beziehungen als Knoten farblich von Begriffen als Knoten zu differenzieren. Eine Beschriftung der Pfeile entfällt dadurch. Eine Gegenüberstellung des Verhältnisses von Beziehungen in herkömmlichen und in kategorienorientierten Concept Maps ist in Abbildung 3.6 für die Aussage „Licht geht von einer Münze aus“ dargestellt.

Da mehrere sprachliche Ausdrücke zu einem Element zusammengefasst werden können und ein Element in einer sprachlichen Erklärung mehrfach verwendet werden kann, ist es möglich, dass ein Element zu mehreren anderen Elementen in Beziehung steht. Gleichzeitig können auch zwei Elemente in mehreren Beziehungen zueinander stehen. Verschiedene Konstellationen von Quellen-, Ziel- und Beziehungsknoten sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Darin ist ganz links die Aussage „Licht geht von einer Münze aus“ abgebildet, in der Mitte links die beiden Aussagen „Licht geht von einer Münze aus“

und „Licht gelangt ins Auge“, in der Mitte rechts die Aussage „Die Grenzfläche ist zwischen Wasser und Luft“ sowie ganz rechts die Aussage „Die Münze erscheint gehoben“.

Beziehungen, die als Quelle oder Ziel eine andere Beziehung haben, sollen im Rahmen dieser Arbeit als *Metabeziehung* bezeichnet werden. Zur besseren Lesbarkeit von Concept Maps können nun auch Beziehungen und Metabeziehungen farblich voneinander unterschieden werden. Die Kontrastierung von Beziehungen und Metabeziehungen ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Darin sind die Aussagen „Licht wird an der Wasseroberfläche gebrochen. Somit ändert es seine Richtung,“ visualisiert.

Das Identifizieren und Extrahieren der Beziehungen zwischen den Elementen wird in den Teilschritten 7-9 im Kodiermanual beschrieben. An dieser Stelle soll eine Konvention zur horizontalen Anordnung von Elementen und Beziehungen aufgestellt werden. Die Elemente des Phänomens bzw. der Theorie können prinzipiell jeweils beliebig angeordnet werden: vertikal aufgereiht, als Cluster oder ihrerseits wiederum in mehreren Spalten. In den hier verwendeten, modifizierten Concept Maps sollen Elemente des Phänomens (links) und der Theorie (rechts) in je zwei Spalten angeordnet werden in Abhängigkeit davon, ob sie mit der jeweils anderen Domäne verbunden sind oder nicht. Das heißt, dass in einer Spalte nur die Elemente des Phänomens enthalten sind, die nicht in Beziehung mit einem Element der Theorie stehen, und in einer weiteren Spalte die Elemente des Phänomens, die in Beziehung mit einem Element der Theorie stehen. Für die Elemente der Theorie gilt die Konvention spiegelverkehrt in Bezug auf ihre Beziehungen zu Elementen des Phänomens. Dadurch werden auch Beziehungen horizontal voneinander getrennt, die nur zwischen Elementen des Phänomens oder nur zwischen Elementen der Theorie liegen bzw. die Elemente des Phänomens mit Elementen der Theorie verbinden (siehe Abb.3.9). Die vertikale Anordnung von Elementen in den jeweiligen Spalten erfolgt flexibel unter dem Primat der Lesbarkeit.

3.3.4 Bewertung der Aussagen

Beziehungen formen mit den verbundenen Quell- und Zielelementen Propositionen. Propositionen oder Aussagen sind die kleinsten Einheiten in Concept Maps, die richtig oder falsch sein können. Eine dichotome Bewertung ist damit prinzipiell möglich und muss auf Basis einer zuvor erfolgten fachlichen Analyse geschehen. Dabei sind aus fachphysikalischer Perspektive mehrere Ursachen für eine Bewertung als ‘falsch’ oder ‘inkorrekt’ denkbar. Eine Aussage kann als inkorrekt angesehen werden, wenn sie einer Aussage aus einem fachlich etablierten Prinzip oder Zusammenhang widerspricht. Beispielsweise würde die Aussage: „Licht wird weg vom Lot gebrochen“ beim Eintritt des Lichts in ein dichteres Medium dem Snellius’schen Brechungsgesetz widersprechen, aus dem folgt, dass Licht in diesem Fall *hin zum Lot* gebrochen wird.

Eine andere mögliche Ursache für die Bewertung einer Aussage als ‘inkorrekt’ kann vorliegen, wenn zwar nicht eindeutig und vordergründig gegen eine Gesetzmäßigkeit verstoßen wird, jedoch ein ungeeignetes physikalisches Konzept in einer Aussage verknüpft wird. Ein Beispiel dafür ist die Proposition „Lichtstrahlen werden an Wasseratomen gebrochen“. Erstens tritt Wasser in Molekülform auf, ist

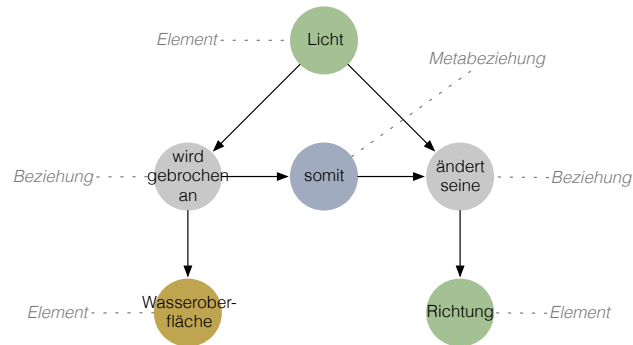


Abbildung 3.8: Beziehungen und eine Metabeziehung zwischen drei Elementen in einer kCM

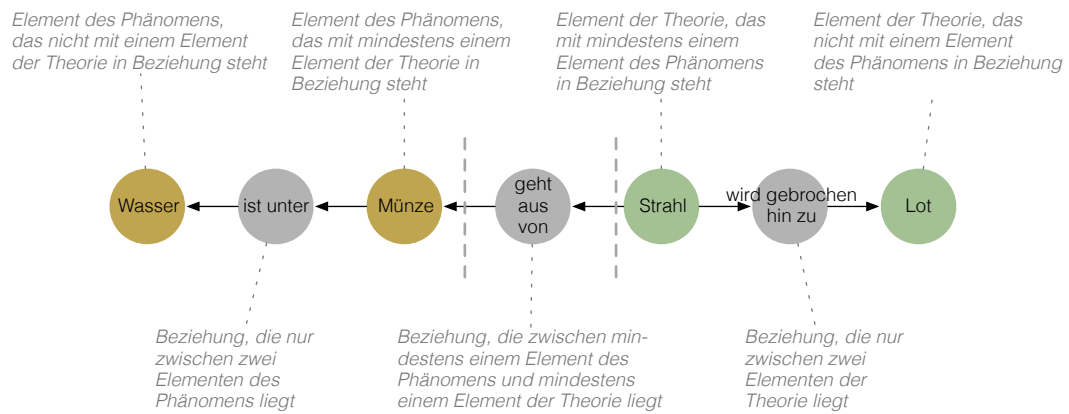


Abbildung 3.9: Horizontale Struktur in einer kCM

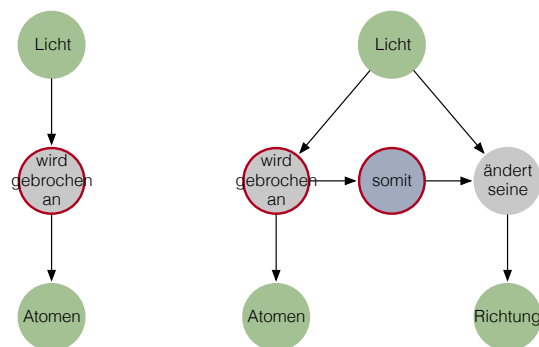


Abbildung 3.10: Kennzeichnung inkorrektter Propositionen in einer kCM; links: einfache Proposition, rechts: Metaproposition

folglich kein einzelnes Atom und zweitens kann zwar auch Wasser eine Teilchenstruktur zugewiesen werden, jedoch sind es nicht diskrete Teilchen, an denen Lichtstrahlen gebrochen werden, sondern Grenzflächen zwischen Medien mit bestimmten optischen Eigenschaften.

Eine Proposition kann überdies auch deshalb zurückgewiesen werden, weil sie zwar weder gegen eine physikalische Gesetzmäßigkeit verstößt, noch ein ungeeignetes physikalisches Konzept einbindet, aber einen physikalischen Zusammenhang unangemessen *formuliert*. Ein Beispiel dafür stellt die Aussage „Lichtstrahlen bewegen sich hin zum Lot“ dar. Lichtstrahlen sind bei fester Position der Lichtquelle ortsfeste Entitäten, die die Richtung des Wellenvektors elektromagnetischer Wellen unter bestimmten geometrischen Bedingungen symbolisieren. Diese Richtung bewegt sich jedoch nicht. An die Stelle der Beziehung „bewegen sich hin zum“ kann die angemessenere Formulierung „verlaufen in Richtung“ oder „führen zum“ treten.

Eine weitere Ursache dafür, dass eine Aussage als inkorrekt bewertet wird, besteht, wenn die Aussage zu stark vereinfacht wird, beispielsweise wenn ein komplexerer Zusammenhang in unzulässiger Weise monokausal begründet wird. Ein Beispiel für eine solche unzulässige Vereinfachung lautet: „Die Münze erscheint aufgrund der Brechung gehoben“. Die Brechung kann zwar Bestandteil einer Begründung bzw. Erklärung sein, allerdings ist die Brechung allein keine hinreichende Bedingung für das Auftreten des Phänomens, da außerdem noch ein Beobachter und die mit der Brechung in Zusammenhang stehende Bildkonstruktion weitere notwendige Bedingungen sind. An diesem Beispiel wird auch deutlich, dass eine Aussage unter Umständen erst im Gesamtzusammenhang der Erklärung bewertet werden kann. Denn ob neben der Brechung weitere notwendige Bedingungen genannt werden, ist aus dem genannten Satz allein nicht ersichtlich.

Weitere Gründe für das Zurückweisen von Aussagen können weniger allgemeiner Natur sondern kontextspezifisch sein und erwachsen aus einer konkreten Analyse sowohl des fachlichen Inhalts sowie exemplarischer Erklärungen eines betroffenen Phänomens. Aussagen lassen sich unter Umständen aus mehreren der oben genannten Gründe zurückweisen. Diese Gründe sind damit keine disjunkten Kategorienbeschreibungen, sondern Orientierungshilfen bzw. -regeln. Im Kodiermanual ist im zehnten Teilschritt eine Übersicht mit solchen Orientierungsregeln anhand von Beispielsätzen aufgeführt.

Da Propositionen in modifizierten Concept Maps nicht nur aus Elementen und Beziehungen gebildet werden, sondern auch Aussagen selbst Quelle und Ziel einer anderen Beziehung sein können und dadurch Metabeziehungen (ergo: Metaaussagen) gebildet werden, müssen auch diese Metaaussagen bewertet werden. Für sie gelten die gleichen Regeln wie für einfache Propositionen. Wird eine falsche Aussage wiederum in einer Metabeziehung verwendet, dann wird die Metaaussage deshalb ebenfalls zurückgewiesen, da aus einer falschen Aussage keine richtige Aussage gefolgert werden kann. Dadurch pflanzen sich inkorrekte Aussagen unter Umständen fort. In einer modifizierten Concept Map können inkorrekte Aussagen durch die farbliche Hervorhebung der der Proposition zugrundeliegenden Beziehung gekennzeichnet werden. Im Beispiel der Abbildung 3.10 wird links die inkorrekte Aussage „Licht wird an Atomen gebrochen“ visualisiert. Rechts in der Abbildung werden die beiden Aussagen „Licht wird an Atomen gebrochen. Somit ändert es seine Richtung,“ dargestellt. Darin ist die Aussa-

ge „Licht wird an Atomen gebrochen,“ als inkorrekt gekennzeichnet, die Aussage „Licht ändert seine Richtung,“ als korrekt, die Verknüpfung durch das Adverb „somit“ jedoch wiederum als inkorrekt.

Zusammenfassung der Modifikationen von Concept Maps

In vier Schritten wurde ein Verfahren zur Darstellung sprachlicher Erklärungen auf Basis von konventionellen Concept Maps abgeleitet und modifiziert. Diese modifizierte Darstellung soll *kategorienorientierte Concept Map* (kurz: kCM) genannt werden. Die Modifikationen lauten zusammengefasst wie folgt:

- Konzepte bzw. Elemente haben in kCMs eine Kategorienstruktur, die durch die Farbe, Füllung und horizontale Verteilung der Konzepte dargestellt wird.
- Beziehungen werden in kCMs wie Elemente als Knoten dargestellt, heben sich jedoch farblich von Elementen ab.
- Beziehungen können als Quell- und/oder Zielknoten ebenfalls eine Beziehung haben, heißen dann Metabeziehungen und werden ebenfalls farblich gekennzeichnet.
- Aussagen werden aus fachlicher Perspektive bewertet und die zentrale Beziehung bzw. Metabeziehung der Aussage durch eine rote Umrandung gekennzeichnet.

3.4 ERGEBNISSE UND IMPLIKATIONEN

Das oben genannte Ziel besteht in der Entwicklung eines Verfahrens zur Darstellung der Struktur sprachlicher Erklärungen vor dem Hintergrund eines modellorientierten Rahmenkonzepts. Es gibt dementsprechend ein Ergebnis dieser Entwicklung, nämlich das im Kodiermanual detailliert beschriebene Verfahren, sowie ein Ergebnis dieses Verfahrens in der Gestalt kategorienorientierter Concept Maps. Dieser Systematik folgend wird zunächst das Kodiermanual zusammengefasst und seine Erstellung eingeordnet. Im Anschluss werden die Ergebnisse einer Vorstudie vorgestellt, anhand derer zum einen die Güte des Verfahrens eingeschätzt wird und zum anderen Merkmale kategorienorientierter Concept Maps als Ergebnisse der Verfahrens identifiziert und interpretiert werden können. Beide Ergebnisse werden in ausführlicher Form in den Anhängen B (Kodiermanual) und C (Vorstudie) vorgestellt.

3.4.1 Kodiermanual

Das Kodiermanual beschreibt das Verfahren der Übertragung eines Textes in die den kategorienorientierten Concept Maps zugrundeliegende Struktur gemäß dem modellorientierten Rahmenkonzept schrittweise. Die Visualisierung dieser Struktur erfolgt dann mit einem entsprechenden Vektorgrafik-Programm und wird im Kodiermanual ähnlich wie in der oben beschriebenen Verfahrensentwicklung

nur prinzipiell erläutert, da die konkrete Ausführung von der verwendeten Software abhängt. An einigen Stellen sind im Kodiermanual nach der Doppelkodierung durch zwei Beurteiler nachträglich Veränderungen vorgenommen wurden. Diese Veränderungen ergaben sich aus den Erfahrungen durch die Doppelkodierung und müssen somit als Teil der gesamten Verfahrensentwicklung betrachtet werden. Die jeweiligen Stellen sind entsprechend gekennzeichnet. Das im Kodiermanual benutzte Beispiel ist eine Erklärung zum Phänomen der optischen Hebung einer Münze aus einem Schulbuch (Boysen, 1992). Die Visualisierung erfolgt für alle kCMs in dieser Arbeit mit dem Computerprogramm „OmniGraffle“ (2017).

Eine Übersicht über die vier Haupt- und zehn Teilschritte kann wie folgt dargestellt werden:

1. Identifikation der Elemente
 - 1.1 Text lesen
 - 1.2 Nomen und Pronomen im Text markieren
 - 1.3 Nomen und Pronomen auflisten
 - 1.4 Ersetzen von Pronomen durch Nomen
 - 1.4 Transformation von Nomen zu Elementen
2. Kategorisierung der Elemente
 - 2.1 Einordnen der Elemente in die Kategorien Phänomen - Theorie, relevant - nicht relevant
3. Identifikation der Beziehungen
 - 3.1 Besitzanzeigende Beziehungen identifizieren
 - 3.2 Weitere Beziehungen identifizieren
 - 3.3 Metabeziehungen identifizieren
4. Fachliche Bewertung der Aussagen
 - 4.1 Propositionen aus fachlicher Sicht bewerten

Das Kodiermanual wurde unter den oben beschriebenen Gesichtspunkten der Verfahrensentwicklung anhand von verschiedenem Textmaterial aus eigenen Vorarbeiten erstellt, in mehreren Durchläufen erprobt und nach Anwendung an einer Stichprobe in der Vorstudie (siehe nachfolgender Unterabschnitt) überarbeitet. Im Anhang befindet sich dementsprechend die finale Version des Manuals.

3.4.2 Vorstudie

Die Vorstudie ist in den Anhang C eingefügt. Im Folgenden sollen ihr Ziel, die Methoden sowie die Ergebnisse übersichtlich zusammengefasst und dargestellt werden.

Ziel: Die Vorstudie hat das Ziel, die Güte des entwickelten Verfahrens einzuschätzen, Merkmale kategorienorientierter Concept Maps exemplarisch zu benennen und als Eigenschaften von Erklärungen zu deuten sowie zu zeigen, wie Schwierigkeiten im Aufstellen einer sprachlichen Erklärung in kCMs

prinzipiell erkannt werden können. Durch das Erreichen dieses Ziels soll es möglich werden, präzise Aussagen über Eigenschaften von Erklärungen und über Schwierigkeiten beim Aufstellen von Erklärungen treffen zu können.

Methode: Dazu werden insgesamt elf unterschiedliche sprachliche Erklärungen zu optischen Phänomenen untersucht. Die Erklärungen beziehen sich auf drei verschiedene Fotos (siehe Abbildungen C.1, C.2 und C.3 im Anhang C), auf denen jeweils ein Phänomen gezeigt wird, welches mithilfe des Konzepts der Brechung von Lichtstrahlen im Rahmen der geometrischen Optik erklärt werden kann, namentlich ein Foto mit einem gebrochenen Laserstrahl (im Folgenden *Brechung* genannt) sowie ein Foto mit einer optisch gehobenen Münze unter Wasser (*Hebung*) im Vergleich zu einer Münze ohne Wasser und ein Foto mit einem scheinbar geknickten Bleistift im Wasser (*Knickung*) im Vergleich zu einem Bleistift ohne Wasser. Eine der elf Erklärungen wurde einem Lehrbuch (Boysen, 1992) entnommen und bezieht sich allgemein auf das Phänomen einer scheinbar gehobenen Münze, nicht jedoch explizit auf das genannte Foto zur Hebung, auf dem zwei Münzen (eine im Wasser, eine nicht im Wasser) zu sehen sind. Vier der übrigen Erklärungen stammen von einem Experten (Fachdidaktik Physik), wobei das Phänomen des gebrochenen Laserstrahls aus zwei unterschiedlichen Perspektiven sowie je einmal die Hebung sowie die Knickung erklärt wurden. Die weiteren sechs Erklärungen wurden von Studierenden im Kombinationsbachelor-Studiengang Physik mit Lehramtsoption verfasst, von denen drei Erklärungen mündlich und drei schriftlich erstellt wurden. Die mündlichen Erklärungen wurden transkribiert und vor der Anwendung des Verfahrens zum Erstellen von kCMs in einfache, auswertbare Aussagen (*semantische Einheiten*) transformiert. Alle schriftlichen Ausgangsprodukte in Form der ursprünglichen Erklärungen und Transkripte wurden im Anhang E eingefügt.

Da das Verfahren aus mehreren Schritten besteht, ist auch die Güte des gesamten Verfahrens durch die Einschätzung der Güte der einzelnen Schritte zu belegen. Dabei wurden die Identifikation und Kategorisierung der Elemente zusammengefasst in einem ersten Schritt beurteilt sowie die Identifikation der Beziehungen und die fachliche Bewertung in zwei weiteren Schritten eingeschätzt. Für die Beurteilerübereinstimmung des ersten Schritts wurden sieben Erklärungen herangezogen, für die des zweiten und dritten Schritts jeweils drei. Nach welchen Kriterien die Beurteilerübereinstimmung sowie die Einschätzung der Validität vorgenommen wurde, ist in den Anhang D ausgelagert, da diese Kriterien für mehrere Teile dieser Arbeit gültig sind.

Ergebnisse und Interpretation: Die Identifikation und Kategorisierung von Elementen durch zwei Beurteiler erfolgte mit einer substanziellen Übereinstimmung (Cohens $\kappa = 0,73$). Die semantische Gültigkeit dieses Schritts als wichtiger Aspekt der Validität wurde durch eine Einschätzung der Kategorienbeschreibung von einem Experten belegt (Mayring, 2010). Die Identifikation der Beziehungen zwischen den Elementen ergab eine relative gegenseitige Übereinstimmung zweier Beurteiler von 0,89. Dieser Wert stellt wegen der zu vernachlässigen zufälligen Einigkeit eine nach Landis und Koch (1977) fast perfekte Übereinstimmung dar. Die Gültigkeit dieses Schritts ist durch die grammatikalische

Funktion der untersuchten sprachlichen Elemente gegeben, die genau darin besteht, Beziehungen zu und zwischen Objekten bzw. Subjekten (Elemente der kCMs) herzustellen (Pittner, 2016). Schließlich wurde die fachliche Bewertung der Aussagen von zwei Beurteilern mit einer substanziellen Übereinstimmung vorgenommen (Cohens $\kappa = 0,77$) und die Validität ebenfalls durch eine Einschätzung der Kriterien der fachlichen Bewertung im Kodiermanual von einem Experten belegt. Zudem kann die Validität des gesamten Verfahrens durch zwei inhaltliche Argumente gestützt werden. Ein Argument betrifft die beiden Expertenerklärungen eo3-A und eo3-A2, die das Phänomen des gebrochenen Laserstrahls aus unterschiedlichen Perspektiven erklärt, nämlich einmal wie angedacht als Visualisierung der Strahlenskizze sowie einmal im Kontext der scheinbaren Hebung, in dem ein Objekt (Laserstrahl) von einem Beobachter in einem anderen Medium durch eine Grenzfläche hindurch betrachtet wird. Diese Perspektiven können in den resultierenden kCMs wiedererkannt werden. Das zweite Argument ist die besondere Stellung des Beobachters als Teil des Phänomens der scheinbaren Hebung eines Gegenstandes. Diese besondere Stellung kann in einer Darstellung des Netzwerkparameters der Zwischenzentralität (*betweenness centrality*) des Elements 'Beobachter' in den Expertenmaps br-B sowie eo3-B jeweils durch einen hohen Wert (große Knoten) belegt werden.

Sowohl formale als auch inhaltliche Merkmale kategorienorientierter Concept Maps können als Eigenschaften sprachlicher Erklärungen gedeutet werden. Somit sind Schwierigkeiten beim Aufstellen einer sprachlichen Erklärung zu einem Phänomen potenziell identifizierbar und lokalisierbar. Dazu zählen die *Art und Lage fachlich inkorrektter Aussagen*, deren konstituierende Beziehung innerhalb der Bereiche Phänomen und Theorie oder zwischen diesen Bereichen liegen kann, sowie die Einbindung nicht relevanter Elemente und die fehlende Einbindung zentraler relevanter Elemente. Weiterhin können die Maps eine *Schiefte* aufweisen, d.h. es kann eine stark ungleichmäßige Verteilung der Elemente auf die Bereiche Phänomen und Theorie vorliegen, wodurch eine verkürzte Darstellung des relevanten Phänomen- oder Theorieausschnitts gekennzeichnet wird. Diese Schiefe kann als undifferenzierte Phänomenperzeption oder als mangelndes Fachwissen bzw. als unzureichende Fähigkeit zur Versprachlichung der beiden Strukturen interpretiert werden. Maps können insgesamt vergleichsweise *klein* ausfallen, was eine verkürzte Gesamtdarstellung sowohl des Phänomens als auch der Theorie indiziert. Wenn beide Bereiche zwar relativ ausführlich dargestellt werden, können sie trotzdem noch durch eine *geringe Anzahl von Verbindungen* in Beziehung zueinander gesetzt werden. In diesem Fall werden zwar sowohl das Phänomen als auch die Theorie differenziert erkannt, als auch beides versprachlicht, es gelingt in der Erklärung jedoch nicht, diese Bereiche sprachlich miteinander zu verbinden. Darüber hinaus können unterschiedliche Formen der *Fragmentierung* in kCMs auftreten, nämlich zum einen in der Form, in der Phänomen- und Theoriebereich vollständig voneinander getrennt sind, des weiteren in der Form, in der einzelne Fragmente jeweils Phänomen- und Theorie-Bereiche verbinden, aber untereinander getrennt sind, und schließlich in Form von Hybriden aus den beiden zuvor genannten Formen. Die Fragmente können im Rahmen von *p-Prims* (vgl. z.B. DiSessa, 1988) gedeutet werden. Schließlich können einzelne Teilstrukturen (*Figuren*) in kCMs betrachtet werden, wie z.B. der Lichtweg von einem scheinbar gehobenen Gegenstand zum Beobachter unter Berücksichtigung

der Brechung. Diese Figuren umfassen in Erklärungen des gleichen Phänomens unterschiedlich viele Elemente. Die kleinste gefundene Figur beinhaltet nur das Element *Brechung*, wohingegen eine ausgewählte Expertenerklärung den Lichtweg mit sieben Elementen und sechs Beziehungen nachzeichnet. Im Rahmen einer größeren Stichprobe kann die Stabilität solcher Figuren in verschiedenen Erklärungen untersucht und gegebenenfalls in Zusammenhang mit dem Begriff des Chunking (vgl. z.B. Chi, 1978) gebracht werden.

3.4.3 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte ein Verfahren entwickelt werden, das die Struktur sprachlicher Erklärungen vor dem Hintergrund des zuvor etablierten modellorientierten Rahmenkonzepts darzustellen vermag. Das Ergebnis der Entwicklung ist ein Kodiermanual, mit dessen Hilfe sprachliche Erklärungen in Form von kategorienorientierten Concept Maps (kCMs, 'Maps') dargestellt werden können. Kategorienorientierte Concept Maps können Elemente und Beziehungen zwischen Elementen visualisieren, aber auch ganze Aussagen in Beziehung zueinander setzen und damit im Vergleich zu herkömmlichen Concept Maps und Mind Maps sprachlich komplexere Strukturen visualisieren sowie Fragmentierungen entlang oder quer zur Grenze zwischen Phänomen und Theorien aufdecken. Darüber hinaus können in kCMs Elemente dem Phänomen- oder Theorenbereich zugeordnet werden. Beziehungen lassen sich danach unterscheiden, ob sie innerhalb oder zwischen diesen Bereichen liegen. Aussagen können aus fachlicher Perspektive bewertet werden. Damit können auch unzulässige Beziehungen in inkorrekten Aussagen dem Phänomen- oder Theoriebereich bzw. dazwischen eingeordnet werden. Somit sind kategorienorientierte Concept Maps anderen netzwerkartigen Darstellungen in Präzision und Potenzial möglicher Aussagen über die Verwendung von Modellen in schriftsprachlichen Erklärungen physikalischer Phänomene klar überlegen.

Ob, in welcher Häufigkeit und Ausprägung Merkmale und dementsprechende Schwierigkeiten tatsächlich auftreten, konnte mit dem geringen Stichprobenumfang nicht ermittelt werden. Dafür soll im folgenden Kapitel eine größere Anzahl von Erklärungen zu den bereits gezeigten Phänomenen untersucht werden, und zwar sowohl von einer größeren Anzahl Physiklernender als auch einer größeren Anzahl von Experten.

4 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG

Inhalt des Kapitels

4.1	Ausgangslage	60
4.1.1	Modelle in Erklärungen bei naturwissenschaftlichen Lehr-Lern-Prozessen	60
4.1.2	Erklärungen und das Verständnis optischer Phänomene	63
4.2	Forschungsfragen	65
4.3	Methoden	66
4.3.1	Datenerhebung	66
4.3.2	Datenaufbereitung und Datenanalyse	68
4.4	Ergebnisse	69
4.4.1	Nicht relevante Elemente (FF 1a)	70
4.4.2	Fehlende zentrale Elemente (FF 1b)	74
4.4.3	Fehlerhafte Beziehungen (FF 2)	76
4.4.4	Post-hoc-Analyse: Lage der fehlerhaften Beziehungen in Propositionen	81
4.4.5	Besondere Ausprägungen formaler Merkmale der Maps (FF 3)	89
4.5	Diskussion	95
4.5.1	Diskussion der Kennwerte für die Beurteilerübereinstimmung	95
4.5.2	Nicht relevante und fehlende zentrale Elemente (FF1)	95
4.5.3	Fehlerhafte Beziehungen (FF2)	98
4.5.4	Post-hoc-Analyse	100
4.5.5	Besondere Ausprägungen formaler Merkmale der Maps (FF3)	101
4.5.6	Zwischenfazit und Ausblick	103

In Kapitel 2 dieser Arbeit wurde ein Rahmenkonzept bereitgestellt, welches Modelle in Erklärungen in einen expliziten Zusammenhang zu Phänomenen und Theorien setzt. Dieser Zusammenhang stellt sich als wesentliches Merkmal physikalischen Denkens und Arbeitens heraus. Vor dem Hintergrund des Rahmenkonzepts konnte im Kapitel 3 ein Verfahren entwickelt werden, welches potenziell in der

Lage ist, sprachliche Erklärungen von Phänomenen sowie Schwierigkeiten beim Aufstellen dieser Erklärungen zu charakterisieren. Nun soll dieses Verfahren angewendet werden, um genau solche Schwierigkeiten zu identifizieren, zu lokalisieren, zu interpretieren und daraus Schlussfolgerungen für das Physiklernen zu ziehen. Zunächst wird dabei ein Überblick über den Stand der Forschung zur Verwendung von Modellen (in Erklärungen) sowohl allgemein als auch insbesondere in der Optik gegeben und ein Defizit in diesem Forschungsstand ausgemacht, aus dem Forschungsfragen erwachsen. Das entwickelte Verfahren und dessen Endprodukt, nämlich kategorienorientierte Concept Maps, werden dann genutzt, um diese Fragen beantworten zu können.

4.1 AUSGANGSLAGE

4.1.1 Modelle in Erklärungen bei naturwissenschaftlichen Lehr-Lern-Prozessen

Im Überblick über die vorgestellten Untersuchungen zu Modellen im Zusammenhang mit Erklärungen zeigt sich, dass Kategorisierungen von Erklärungen oder Modellen unter verschiedenen Gesichtspunkten eine wesentliche Rolle einnehmen. Die Analyse der Erklärungen verschiedener Probandentypen (Schüler, Lehrer, Studierende) basiert auf unterschiedlichen betrachteten Analyseeinheiten (Elemente bzw. Konzepte, Propositionen, Sätze oder ganze Interviewabschnitte). Einige Untersuchungen berücksichtigen dabei explizit fachliche Kriterien (z.B. Peker & Wallace, 2011; Redfors & Ryder, 2001; Sandoval, 2003), andere eher allgemeine oder epistemische Kriterien (z.B. Grosslight et al., 1991). Teilweise steht in den Erhebungen der Phänomenbereich im Vordergrund (Metz, 1991), teilweise werden nur theoretische Konzepte berücksichtigt (Redfors & Ryder, 2001), sowie teilweise beide Domänen (Sandoval, 2003). Überdies werden Beschreibungen theoretischer Konzepte als Phänomenerklärungen aufgefasst (Stefani & Tsapalis, 2009). Eine konsequente und explizite Berücksichtigung des Zusammenhangs von Modellen in Erklärungen zu Phänomenen und Theorien auf elementarer Ebene findet sich dabei nicht.

Aufgrund der besonderen Bedeutung von Modellen bei der Verknüpfung von zu erklärenden Phänomenen mit dem individuell oder wissenschaftlich etablierten Wissen sind Modelle für Erklärungen und Modellvorstellungen von Physiklernenden dementsprechend ein zentraler Untersuchungsgegenstand. Einen Überblick über empirische Untersuchungen zur Verwendung von Modellen durch Lernende in den Naturwissenschaften geben Nicolaou und Constantinou (2014).

Grosslight et al. (1991) erfassen das Verständnis von Modellen und deren wissenschaftliche Bedeutung allgemein und nicht anhand eines ausgewählten fachspezifischen Kontextes. Krell et al. (2015) analysieren übergreifend für Disziplinen Physik, Chemie und Biologie ebenfalls ein eher generelles Verständnis von Modellen (u.A. in Erklärungen) durch Lernende in den Naturwissenschaften. Pluta et al. (2011) untersuchen epistemische Kriterien „guter“ Modelle beispielsweise hinsichtlich ihrer Funktion als Erklärung. Stefani und Tsapalis (2009) kategorisieren Erklärungen bzw. Modelle von Chemiestudierenden. Dabei handelt es sich jedoch nicht um Erklärungen beobachtbarer Phänomene im eigentlich Sinn, sondern um Beschreibungen von innertheoretischen Zusammenhängen wie z.B.

von Atomorbitalen oder der Schrödingergleichung.

Im Rahmen der Mechanik erfasst z.B. Metz (1991) die Entwicklung physikalischer Erklärungen in einer Quasi-Längsschnittstudie an SchülerInnen im Alter von 3-9 Jahren. Die Lernenden sollten in Interviews erklären, warum sich bei verschiedenen Konstellationen von Zahnrädern einige der Zahnräder drehen und andere nicht. Die Erklärungen wurden unter anderem anhand der benutzten Konzepte und Beziehungen kategorisiert und zwischen den Altersstufen verglichen. Bei den untersuchten Konzepten handelt es sich ausschließlich um Elemente des beobachteten Phänomens (Zahnrad, Knopf usw.), da den Teilnehmenden vor allem in den jüngeren Altersgruppen noch kein durch fachspezifische Lernprozesse etabliertes (theoretisches) Wissen zur Verfügung stand. Erklärungen werden hier also in einem propädeutischen Verständnis untersucht. Die Autorin identifiziert in ihrer Untersuchung verschiedene Arten von fundamentalen Veränderungen (z.B. das Ersetzen einer Erklärung durch eine völlig neue) sowie schrittweisen Veränderungen.

Dagher und Cossman (1992) kategorisieren Erklärungen von Lehrern in Physik und Biologie anhand von Tonaufnahmen aus mehreren Unterrichtsstunden. Sie identifizieren verschiedene Typen von Erklärungen von Phänomenen auf der Basis von mehrere Sätze umfassenden Kodiereinheiten aus den Tonaufnahmen zu den jeweiligen Erklärungen (analoge, genetische, teleologische Erklärungen usw.), gehen dabei jedoch nicht weiter auf eine detailliertere, elementare Struktur der Erklärungen ein.

Redfors und Ryder (2001) untersuchen schriftliche Erklärungen von Phänomenen der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Metallen von Physikstudierenden. Den Studierenden lagen die zu erklärenden Phänomene (reflektierendes Metall, glühende Metallstäbe etc.) offenbar nicht vor, sodass sie aus dem Gedächtnis abgerufen werden sollten und nicht beobachtet werden konnten. Eine differenzierte Darlegung der Phänomenstruktur in der Erklärung wird somit durch das Untersuchungsdesign unter Umständen systematisch eingeschränkt. Erklärungen werden von den Autoren als 'angemessen' bewertet, wenn sie die notwendigen, relevanten Elemente und Aussagen beinhalten, als 'ungenügend detailliert', wenn diese Elemente und Aussagen nicht vollständig beschrieben wurden, und als 'unangemessen', wenn nicht relevante Begriffe oder inkorrekte Aussagen überwiegen. Die Bewertung erfolgte auf Basis von unterschiedlich großen Kodiereinheiten (Begriffe, Aussagen, mehrere Sätze). Für die Beurteilerübereinstimmung bezüglich dieser Bewertung werden keine Kennwerte angegeben. Die Autoren stellen fest, dass die Studierenden dazu neigen, ungeeignete Modelle wie z.B. das Bohr'sche Atommodell in ihren Erklärungen zu verwenden oder für verwandte Phänomene verschiedene Modelle verwenden.

Sandoval (2003) analysiert Erklärungen des biologischen Phänomens, bei dem 1977 auf einer der Galapagosinseln ein Massensterben der dort beheimateten Finkenpopulation einsetzte und nur einige Finken überlebten. Die Erklärungen wurden von Biologielernenden einer amerikanischen Highschool in einer Scaffolding-Lernumgebung erstellt, welche die Struktur sowie eine Auswahl möglicher Beobachtungsdaten vorgab. Sandoval (2003) interessiert sich vor allem dafür, wie die Lernenden mit Hilfe dieser Lernumgebung in Erklärungen Zusammenhänge zwischen Aussagen der Evolutionstheorie und vorgegebenen Daten aus empirischen Beobachtungen herstellen können. Damit stehen

Modelle hier explizit in einem funktionalen Kontext und es wird betont eine Phänomen-Theorie-Unterscheidung vorgenommen, indem zwischen Aussagen der Evolutionstheorie und Beobachtungsdaten als Ausschnitte des Phänomens unterschieden wird. Der Fokus der Untersuchung liegt jedoch in der Analyse von Verknüpfungen ganzer Aussagen mit entsprechenden Daten. Die relevanten Daten und Aussagen waren durch die Scaffolding-Umgebung vorgegeben. Der Autor findet einen positiven Einfluss einer solchen Scaffolding-Umgebung auf die Gesamtqualität der Erklärungen, wenngleich hinsichtlich der Aussagekraft dieses Ergebnisses einschränkend festgehalten werden muss, dass es offenbar weder eine Vergleichsgruppe gab noch der Einfluss der Umgebung in einem Pre-Post-Design untersucht wurde. Ungeachtet dessen zeigen sich einige Schwierigkeiten in den Erklärungen, wenn die Beobachtungsdaten eine komplexere Struktur aufweisen.

Peker und Wallace (2011) untersuchen in einer explorativen und qualitativen Studie die Merkmale schriftlicher Erklärungen Biologielernender an Sekundarschulen von Phänomenen aus verschiedenen Kontexten der Biologie (z.B. Osmose oder Genetik). Die Erklärungen wurden auf Basis tatsächlicher Beschäftigung mit den Phänomenen erhoben. Die Funktion von Modellen in Erklärungen von Phänomenen wird explizit berücksichtigt. In der Untersuchung wurden schriftliche Erklärungen satzweise mit Codes wie z.B. „Evidenz, Ursache, Effekt, Elaboration, Schlussfolgerung und Vermutung“ (Peker & Wallace, 2011, S. 175, Übers. d. Verf.) sowie Generalisierungen oder Beschreibungen belegt. Die Erklärungen stellen sich dabei eher als Beschreibungen des Phänomens heraus, Zusammenhänge mit etablierten Theorien werden von den Lernenden kaum berücksichtigt. Die Autoren beleuchten damit ausdrücklich einen Phänomen-Theorie-Zusammenhang in den Erklärungen, analysieren diesen Zusammenhang jedoch eben satz- und nicht elementweise. Damit können keine Aussagen darüber getroffen werden, *wie* Zusammenhänge auf der Ebene der Begriffe bzw. Elemente in den Erklärungen hergestellt werden. In dem Beitrag fehlen sowohl Kennwerte für die Güte der Kodierung als auch eine Darlegung der Kriterien dafür, wann ein Satz mit welchem Code identifiziert wurde.

Cheng und Brown (2015) untersuchen Modelle in den Erklärungen magnetischer Phänomene von Fünftklässlern, insbesondere die zeitliche Entwicklung und Korrektur der Erklärungen in einem Paralleltestdesign mit und ohne Scaffolding. Außerdem wird der Einfluss von Modellkriterien (etwa die Visualisierung unsichtbarer Elemente und Erklärungskraft der Modelle) auf die Erklärungen analysiert. Die Lernenden waren vor der Untersuchung in umfangreiche Experimentiersettings eingebunden. Sowohl die Entwicklung als auch die Verwendung von Modellkriterien in der Scaffolding-Umgebung zeigen einen positiven Effekt. Eine explizite Berücksichtigung einer Phänomen-Theorie-Struktur ist in der Untersuchung nicht zu erkennen. Die Autoren ziehen dagegen eine Trennlinie zwischen makroskopischem Verhalten und mikroskopischen Elementen in den Erklärungen, wobei die Visualisierung unsichtbarer Strukturen (Elementarmagnete) als Indikator für eine bessere Erklärung angesehen wird. Die Autoren geben keine Kennwerte für die Berücksichtigung von Gütekriterien an.

Kokkonen und Mäntylä (2017) lassen Physikstudierende die Helligkeit von Lampen hypothetisch in verschiedenen Anordnungen in einem gezeichneten Stromkreis vorhersagen und analysieren die Verwendung von Begriffen in diesen Erklärungen, sodass dabei Modelle offen in einen funktionalen

Kontext (Vorhersage) gestellt werden. Dabei fokussieren die Autoren ihre Analysen ausschließlich auf die (theoretischen) Begriffe *Stromstärke*, *Spannung* und *Widerstand*; die Gesamtstruktur der Erklärungen und ihrer Merkmale wird von ihnen nicht betrachtet. Sie können unter Verwendung der qualitativen Inhaltsanalyse zeigen, mit welchen Eigenschaften, Bedingungen und Beziehungen untereinander die Elemente in den Erklärungen verknüpft sind. Einige der 31 analysierten Erklärungen enthalten keine der genannten Begriffe, ein Großteil verbindet die Elemente fachlich inkorrekt und nur wenige auf eine angemessenen Weise. Inwiefern die Studierenden vorher Gelegenheit für eine fachliche Auseinandersetzung oder für den praktischen Aufbau verschiedener Schaltungen hatten, geht aus der Veröffentlichung nicht hervor.

Analysen von Erklärungen Physiklernender, die konsequent und explizit fachliche Kriterien auf Basis der verknüpften Elemente und Aussagen unter besonderer Berücksichtigung des Zusammenhangs von Erklärungen zu Phänomenen und Theorien darstellen, können in den Untersuchungen bislang nicht gefunden werden.

4.1.2 Erklärungen und das Verständnis optischer Phänomene

Speziell in Untersuchungen zum Verständnis optischer Phänomene wird der konkrete Phänomen-Theorie-Zusammenhang kaum ausdrücklich berücksichtigt. Erklärungen sollen oftmals gar nicht anhand realer Phänomene erstellt werden (z.B. Andersson & Kärrqvist, 1983; Harrison & Treagust, 1993; Kaewkhong et al., 2010), sondern auf Basis bildlicher Darstellungen beispielsweise in Form von Skizzen, oder es werden theoretische Konzepte als zu erklärende Phänomene bezeichnet, wie etwa die 'Brechung' (Harrison & Treagust, 1993), was einem hier vertretenen Phänomenverständnis entgegensteht.

Untersuchungen zur Verwendung von Modellen in den Erklärungen von Phänomenen durch Physiklernende auf dem Gebiet der Optik zeigen verschiedene Schwierigkeiten. Zur Erklärung von Phänomenen benutzen Physiklernende häufig Vorstellungen, die von fachlich korrekten Sichtweisen abweichen, wie beispielsweise eine große Anzahl von Untersuchungen zu Schülervorstellungen in der Physik zeigt (für einen Überblick siehe Müller, Wodzinski & Hopf, 2011).

Harrison und Treagust (1993) berichten einen positiven Einfluss der Verwendung von Analogien auf das Verständnis des Phänomens der Brechung von Zehntklässlern. Das konzeptuelle Verständnis wird in der Untersuchung dadurch erfasst, dass die Lernenden das Verhalten von Licht bei verschiedenen Anordnungen der beteiligten Medien vorhersagen. Bei der Brechung von Strahlen handelt es sich um eine theoretische Beschreibung von Licht im Strahlenkonzept, welches zwar in Zusammenhang mit anderen Konzepten der Optik (Wellen, Felder) gebracht werden kann, nicht jedoch um ein Phänomen als eine durch Beobachtung in der realen Welt erkannte Struktur im eigentlichen Sinn (vgl. dazu Anhang A 'Physikalische Grundlagen').

Im Fall von Hebungsphänomenen zeigen Andersson und Kärrqvist (1983), dass es schwedischen Schülern der sechsten bis neunten Klasse nur teilweise gelingt, ein scheinbar gehobenes Objekt unter Wasser überhaupt mit der Brechung von Licht in Verbindung zu bringen. Ein Großteil derer, die die

Brechung als entsprechendes physikalisches Konzept benennen, verwenden sie jedoch beispielsweise richtungsunspezifisch. Den Probanden wurde das Phänomen lediglich in Form einer Skizze aus einer abgelösten Perspektive (also von der Seite) gezeigt, sodass eine eigentliche Begegnung mit dem zu erklärenden Phänomen der optischen Hebung im Rahmen der Untersuchung gar nicht stattfand.

Wagenschein (2009) berichtet episodisch, dass, als er Universitätsstudierende bat, den Verlauf eines ins Wasser gehaltene Ruders nachzuzeichnen, diese das Ruder nach unten abgelenkt darstellten, statt nach oben, und somit das Verhalten von Objekten und Lichtstrahlen verwechselten. Wagner (2013) entdeckt dieses Verhalten ebenfalls bei Physikstudierenden, die teilweise an ein ausgedehntes Objekt, das ins Wasser gehalten wird, Lote und Winkel einzeichnen, und zwar so, wie sie es von der Strahlenskizze (Abb. A.2 im Anhang A) der optischen Brechung her kennen.

Galili und Hazan (2000) stellen fest, dass bei optischen Phänomenen, bei denen Objekte und ihre Bilder für einen Beobachter nicht mehr identisch sind, diese Bilder von Lernenden häufig genauso als körperliche Entitäten angesehen werden wie die Objekte, die sie abbilden („holistische Sicht“, S. 69, Übers. d. Verf.). Selbst nach einer Intervention wird diese Sichtweise häufig verwendet und nur teilweise durch eine andere ersetzt, in der Objektpunkte jeweils durch Lichtstrahlen auf Bildpunkte übertragen werden (jeder Lichtstrahl bildet einen Objektpunkt auf einen Bildpunkt ab). Die Autoren zeigen in ihrer Untersuchung damit, wie die ursprüngliche, holistische Erklärung teilweise durch die Verwendung wissenschaftlich etablierter Elemente (Lichtstrahlen) in eine hybride Form der Erklärung transformiert wird, in der Elemente der Erfahrungswelt und des neu erworbenen Wissens spontan und fachlich unangemessen in Beziehung zueinander gesetzt werden.

Weber (2003) untersucht den Einfluss der vertikalen Vernetzung von Inhalten des Lichtwegekonzepts auf kumulative Lernprozesse mit Hilfe von Concept Maps. Die inhaltliche Güte der Maps, vor allem in Bezug auf die Richtigkeit der Relationen zwischen vorgegebenen Begriffen, unterschied sich dabei nicht wesentlich zwischen einer Versuchsgruppe mit expliziter vertikaler Vernetzung und einer Vergleichsgruppe ohne solche Explizierung. Daneben wurden in den Concept Maps verschiedene Merkmale wie z.B. zerklüftete Begriffsnetze gefunden.

Kaewkhong et al. (2010) analysieren mit Hilfe eines Tests mit einem überwiegend grafischen Antwortformat, den sie an 220 thailändischen Elftklässlern einsetzten, das konzeptuelle Verständnis des Zusammenhangs zwischen Beobachter, Objekt und Bild im Fall der optischen Hebung. Dabei gelingt es einem Großteil der Physiklernenden selbst nach einem konventionellen Unterrichtsgang zur Brechung nicht, die Position des Bildes eines Objektes unter Wasser vorherzusagen oder bei vorgegebener Position von Objekt, Bild und Beobachter diese (grafischen) Elemente fachlich korrekt mit Lichtstrahlen zu verbinden. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt Hüttebräuker (2010), in dessen Untersuchung Physiklernende zwar Aufgaben zur Brechung von Strahlen selbst zufriedenstellend bearbeiten können, sobald diese jedoch (ebenfalls grafisch) in einen Zusammenhang mit Objekten, Bildern und Beobachtern gebracht werden sollten, deutlich schlechter abschneiden.

Insgesamt zeigt sich auch in den Untersuchungen zum Verständnis optischer Phänomene eine fehlende, konsequente und explizite Berücksichtigung des Phänomen-Theorie-Zusammenhangs auf

elementarer Ebene. Wenn, wie im Kapitel 2 dargelegt, Modelle für einen bestimmten wissenschaftlichen Zweck (z.B. den einer Erklärung) eine zentrale Stellung als Vermittler zwischen Elementen von Phänomenen und Theorien haben und gleichzeitig genau diese Vermittlung fehlerbehaftet ist, wie Forschungsergebnisse zeigen, dann ist eine genaue Untersuchung dieser Bruchstelle erforderlich, weil dadurch wertvolle Erkenntnisse in Bezug auf das konzeptuelle Verständnis und auf eine offenbar elementare Fähigkeit im wissenschaftlichen Erkenntnisprozess, nämlich das Modellieren, hervorgebracht werden können.

4.2 FORSCHUNGSFRAGEN

Kategorienorientierte Concept Maps sind, wie in Kapitel 3 dargelegt, potenziell in der Lage, eine genaue Untersuchung schriftlicher Erklärungen auf der Ebene der Elemente, Beziehungen und Aussagen vorzunehmen, weil sie die Phänomen-Theorie-Struktur von Modellen in Erklärungen explizit berücksichtigen und visualisieren. Dabei können sowohl formale als auch inhaltliche Merkmale von kCMs als Eigenschaften der zugrunde liegenden sprachlichen Erklärungen interpretiert werden. Diese Merkmale sind vor allem die Formen der Maps, die Verwendung der Elemente in den einzelnen Kategorien sowie die Beziehungen zwischen den Elementen und die dadurch gebildeten Aussagen. Die Analyse der Merkmale steht daher im Mittelpunkt des Forschungsinteresses. ‘Schwierigkeiten’ sind dementsprechend in der Auswahl der relevanten Elemente des erkannten Phänomens und des etablierten physikalischen Wissens sowie in der fachlich korrekten Verknüpfung dieser Elemente zu verorten. Die Forschungsfragen zielen darauf ab, diese Schwierigkeiten konkret zu benennen, zu lokalisieren und zu interpretieren.

1. Welche Fehler in Bezug auf die Elemente in den kategorienorientierten Concept Maps können in Erklärungen Studierender mit Physikbezug aufgedeckt werden, d.h.:
 - a) Welche nicht-relevanten Elemente werden in den Erklärungen verwendet?
 - b) Welche (in Bezug auf die Erklärungen von Experten) zentralen Elemente fehlen in den Erklärungen?
2. Welche Fehler in Bezug auf die Beziehungen zwischen den Elementen in den kCMs können in Erklärungen Studierender mit Physikbezug aufgedeckt werden, d.h.: Welche inkorrekten Beziehungen werden gefunden und wo liegen diese inkorrekten Beziehungen?
3. Welche Rückschlüsse können von besonderen Ausprägungen formaler Merkmale der kCMs hinsichtlich ihrer Elemente und Beziehungen auf die zugrundeliegenden sprachlichen Erklärungen gemacht werden?

Mit dem Aufzeigen der formalen und inhaltlichen Merkmale und Schwierigkeiten in den Maps sollen individuell Bruchstellen auf der Ebene der Elemente, Beziehungen und Propositionen identifiziert werden, sodass daraus auch konkrete und individuelle Hilfestellungen für Maßnahmen in Bezug auf

das Lernen von Naturwissenschaften generiert werden können, und zwar derart, dass dabei die fachlich angemessene Verknüpfung von erkannten Phänomenen und erlerntem theoretischen Wissen im Vordergrund steht. Aus der Sicht der in Kapitel 2 dargestellten praxisorientierten Perspektive naturwissenschaftlicher Erkenntnisprozesse erscheint die Beantwortung der Forschungsfragen als besonders wertvoll, da es sich bei dieser Verknüpfung um ein zentrales Element naturwissenschaftlichen Arbeitens, nämlich um Modellierungsprozesse, handelt.

4.3 METHODEN

4.3.1 Datenerhebung

Die schriftlichen Erklärungen wurden im Juli 2016 am Physikinstitut der Humboldt-Universität erstellt. Eine Übersicht über die Stichprobe der Hauptstudie zeigt die Tabelle 4.1. Die Nummerierung der Probanden durch Kombination aus Buchstaben a - j und Zahlen 01 - 04 resultiert aus neun bereitgestellten Arbeitsplätzen (a - j), die von mehreren Probanden (01 - 04) besetzt waren, Arbeitsplatz 'i' existierte nicht. Die Teilnehmenden mit den Studiengangkennzeichnungen 'MBP' und 'MC' stammen aus drei Übungen zur Vorlesung in Theoretischer Physik III für Monobachelor Physik. Diese Teilnehmer haben eine Experimentalphysik-Vorlesung zur klassischen Optik oder die klassische Optik innerhalb eines anderen Studien-Moduls gehört. Teilnehmenden mit der Kennzeichnung 'MBB' besuchten Tutorien zur Experimentalphysik II für Biologen. In der Vorlesung und in den Tutorien wurden zwei Wochen vor dieser Untersuchung theoretische und experimentelle Grundlagen zur geometrischen Optik, zu optischen Geräten sowie insbesondere auch zur optischen Brechung vermittelt. Studierende mit der Kennzeichnung 'KBP' waren Studierende des Studiengangs Kombibachelor mit Physik als Kern- oder Zweitfach, z.B. mit Lehramtsoption. Die Teilnehmenden x01, x02 und x03 gehören als wissenschaftliche Mitarbeiter oder Professoren zum wissenschaftlichen Personal im Bereich der Didaktik und zeichnen sich durch ihre Lehrtätigkeit in Bezug auf die Brechung und auf Phänomene der optischen Hebung mit einem Spezialwissen aus.

Alle Studierenden erhielten die Aufgabe, zwei der drei ausgewählten Phänomene Brechung, Hebung und Knickung (siehe Abbildungen C.1, C.2 und C.3) unabhängig voneinander, also ohne inhaltlichen Bezug zueinander, zu erklären¹. Die Anordnungen (Aquarium, weiße Kunststoffquader, Wasser, Laser, Münze, Bleistift) waren für die Studierenden aufgebaut und von allen Seiten einsichtig. Zusätzlich lagen jedem Teilnehmenden entsprechend der zu erklärenden Phänomene zwei Fotos im DIN-A4-Format vor. Den Studierenden standen Laptops mit einem geöffneten Texteditor-Fenster zur Verfügung sowie Papier für Skizzen. Die Experten sollten alle drei gezeigten Phänomene erklären. Dabei bezogen die Experten x02 und x03 ihre Erklärungen zum 'Bleistift' jeweils stark auf ihre Erklärung zur 'Münze'. Beim Experten x02 war dieser Bezug so stark, dass diese Erklärung nicht mit in die Untersuchungen aufgenommen wurde. Insgesamt konnten somit 64 Erklärungen untersucht werden.

¹Der Arbeitsauftrag kann im Anhang H nachgelesen werden.

Tabelle 4.1: Übersicht: Erklärungen der Hauptstudie

PROBAND	STUDIENGANG	FACHSEMESTER	ERKLÄRTES PHÄNOMEN	OPTIK-VL
ao1	MBP	4	Laserstrahl (S), Münze	ja
ao2	MBP	4	Laserstrahl, Münze	ja
ao3	MBB	2	Laserstrahl, Münze	ja
ao4	MBB	2	Laserstrahl, Münze	ja
bo1	MBP	4	Laserstrahl, Bleistift	ja
bo2	MBP	4	Laserstrahl (S), Bleistift (S)	ja
bo3	MBB	2	Laserstrahl, Bleistift	ja
co1	MBP	4	Münze , Bleistift	ja
co2	MBP	4	Münze (S) , Bleistift	ja
co3	MBB	2	Münze, Bleistift	ja
co4	MBB	2	Münze, Bleistift	ja
do1	MBP	4	Laserstrahl, Münze (S)	ja
do2	MBP	4	Laserstrahl, Münze (S)	ja
do3	KBP	4	Laserstrahl (S), Münze (S)	ja
do4	KBP	6	Laserstrahl (S), Münze (S)	ja
eo1	MBP	4	Laserstrahl, Bleistift (S)	ja
eo2	MBP	4	Laserstrahl, Bleistift	ja
eo4	MBB	2	Laserstrahl (S), Bleistift	ja
fo1	MBP	4	Münze, Bleistift	ja
fo2	MBB	2	Münze, Bleistift	ja
go1	MBP	4	Laserstrahl, Münze (S)	ja
go2	MBB	2	Laserstrahl, Münze	ja
ho1	MBP	4	Laserstrahl (S), Bleistift (S)	ja
ho2	MBB	2	Laserstrahl, Bleistift	ja
ho3	MBB	2	Laserstrahl, Bleistift	ja
jo1	MC	4	Münze (S), Bleistift	ja
jo2	MBB	2	Münze, Bleistift	ja
jo4	MBB	2	Münze, Bleistift	ja
xo1	WP	-	Laserstrahl (S), Münze (S), Bleistift (S)	-
xo2	WP	-	Laserstrahl, Bleistift (S)	-
xo3	WP	-	Laserstrahl, Münze, Bleistift	-

Abkürzungen:

(S) – Erklärung mit Skizze

KBP – Kombibachelor (mit Kern- oder Zweifach Physik)

MBB – Monobachelor Biologie

MBP – Monobachelor Physik

WP – wiss. Personal / Didaktik der Physik

MC – Master of Science Chemie

4.3.2 Datenaufbereitung und Datenanalyse

Die elektronisch erfassten Erklärungen wurden mit einer Nummerierung der Zeilen in eine \LaTeX -Umgebung eingefügt. Die von den Teilnehmenden erstellten Skizzen wurden eingescannt und mit dem Programm „Adobe Illustrator“ (2015) vektorisiert. Sämtliche Tabellen für die Auflistung der Elemente und Beziehungen wurden mit dem Programm „Apple Numbers“ (2015) erstellt. Die kategorienorientierten Concept Maps wurden mit dem Programm „OmniGraffle“ (2016) auf Basis der Tabellen händisch erstellt.

Alle Erklärungen wurden gemäß dem Kodiermanual (siehe Anhang B) in kategorienorientierte Concept Maps übertragen. Wurden in einer solchen (ursprünglichen) Map fachlich inkorrekte Beziehungen und nicht relevante Elemente identifiziert, dann erfolgt die Darstellung der Erklärung in einer zweiten (bereinigten) Map ohne diese Beziehungen und Elemente. Alle sprachlichen Erklärungen, die Tabellen mit den Elementen und Beziehungen sowie die Concept Maps sind in die Anhänge zu dieser Arbeit eingefügt, sodass ein lückenloses Nachvollziehen der einzelnen Schritte für jede einzelne Erklärung möglich ist. Einige der nachfolgenden Ergebnisse ergeben sich aus der Analyse der ursprünglichen Maps, also vor dem Eliminieren fachlich inkorrektter Beziehungen und nicht relevanter Elemente. Andere Ergebnisse werden auf Basis der bereinigten Maps sichtbar. Die zugrundeliegenden Maps werden jeweils genannt.

Von den insgesamt 64 Erklärungen wurden 13 Erklärungen (20%) für die Überprüfung der Beurteilerübereinstimmungen gemäß der Vorgaben im Anhang D (Gütekriterien) zufällig ausgewählt. Das heißt, dass für jede dieser 13 Erklärungen die Kodierung der Elemente, die aufgedeckten Beziehungen und die fachliche Bewertung der Propositionen durch zwei Beurteiler erfasst und verglichen wurden. Jedes erklärte Phänomen ist dabei etwa gleich häufig vertreten (Laserstrahl fünfmal, Münze und Bleistift jeweils viermal; Übersicht in Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Teilstichprobe zur Einschätzung der Beurteilerübereinstimmung in der Hauptstudie

PROBAND	ERKLÄRTES PHÄNOMEN
a01-A	Laserstrahl
a03-B	Münze
b02-A	Laserstrahl
b02-C	Bleistift
c03-B	Münze
d02-A	Laserstrahl
e01-C	Bleistift
e02-C	Bleistift
f01-B	Münze
h01-C	Bleistift
h02-A	Laserstrahl
x01-B	Münze
x02-A	Laserstrahl

Nicht relevante Elemente (FF 1a): Die nicht relevanten Elemente in den (ursprünglichen) Maps werden durch Auflistung der in den Kategorien 1 - 'nicht relevantes Element des Phänomens' und 4 - 'nicht relevantes Element der Theorie' gezeigt. Die Einordnung der Elemente in die Kategorien erfolgt nach dem Kodiermanual. Eine Darstellung dieser Elemente wird getrennt nach den beiden Kategorien sowie bei häufiger Nennung bestimmter Elemente mit einer kurzen Erläuterung des Elements in der jeweiligen Kategorie geschildert.

Fehlende zentrale Elemente (FF 1b): Elemente sind für eine Erklärung zentral, wenn sie aufgrund ihrer fachlichen Bedeutung eine besondere Rolle für die Erklärung des jeweiligen Phänomens spielen. Zentrale Elemente werden daher in den 'Physikalischen Grundlagen' im Anhang A identifiziert und benannt. Die Verwendung der zentralen Elemente wird für das Phänomen A - 'Laserstrahl' sowie zusammen für die Phänomene B - 'Münze' und C - 'Bleistift' untersucht und dargelegt. Zu diesem Zweck erfolgt die Nennung der zentralen Elemente oder von Synonymen tabellarisch, damit besonders häufig oder selten genannte Elemente anhand der absoluten Häufigkeit der Nennung erkannt werden können.

Inkorrekte Aussagen (FF 2): Die inkorrekten Aussagen in den Erklärungen werden durch die fachliche Bewertung der Propositionen in den kCMs auf Basis des Kodiermanuals identifiziert. Die Bewertung erfolgt anhand der jeweils die Aussage kennzeichnenden fehlerhaften Beziehung. Die Darstellung der fehlerhaften Beziehungen wird getrennt nach den gezeigten Phänomenen sowie innerhalb jedes Phänomens nach den Regeln zur fachlichen Bewertung in Tabelle B.2 im Anhang B strukturiert.

Besondere Ausprägungen formaler Merkmale der Maps (FF 3): Die Maps werden daraufhin analysiert, ob sie vor bzw. nach der fachlichen Bewertung, also in der jeweils 'ursprünglichen' und der 'bereinigten' Map, fragmentiert sind, wobei die Art der Fragmente (einzelne Elemente oder größere Fragmente, bereichsübergreifende Fragmente bzw. Isolierung der Bereiche voneinander) beschrieben wird. Darüber hinaus werden einzelne Maps mit besonders auffälliger Verteilung der Elemente auf die Bereiche identifiziert und gedeutet.

4.4 ERGEBNISSE

Die Überprüfung der Beurteilerübereinstimmung für die Kodierung der Elemente zeigt mit einem Wert von Cohens $\kappa = 0.68$ (Vertrauensbereich $0.61 \leq \kappa \leq 0.75$) eine nach Landis und Koch (1977) substanzielle Übereinstimmung ($\chi^2_{df=4} = 667.86 > \chi^2_{krit,df=4} = 9.49$ für $\alpha = 0.05$). Der Wert für Cohens κ liegt damit jedoch etwas schlechter als in der Vorstudie. Bei der Identifikation der Beziehungen auf Basis der gleichen kodierten Elemente zeigt sich eine relative gegenseitige Übereinstimmung von 0.83, die somit ebenfalls etwas schlechter als in der Vorstudie ist. Eine Übersicht über diese Beurteilerübereinstimmungen zeigt die Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3: Übersicht der Beurteilerübereinstimmungen in der Hauptstudie für die Kategorisierung der Elemente durch Cohens κ sowie für die Identifikation der Beziehungen durch die relative gegenseitige Übereinstimmung

ERKLÄRUNG	COHENS κ	RELATIVE GEGENSEITIGE ÜBEREINSTIMMUNG
ao1-A	0.52	0.76
ao3-B	0.68	0.73
bo2-A	0.60	0.82
bo2-C	0.69	0.73
co3-B	0.70	0.80
do2-A	0.58	0.88
eo1-C	0.35	0.83
eo2-C	0.83	0.82
fo1-B	0.91	0.82
ho1-C	0.89	0.84
ho2-A	0.62	0.87
xo1-B	0.63	0.87
xo2-A	0.78	0.88
Gesamt	0.68	0.83

Cohens κ nimmt für die Beurteilerübereinstimmung der fachlichen Bewertung der Propositionen nach Landis und Koch (1977) einen moderaten Wert von $\kappa = 0.52$ an (Vertrauensbereich $0.35 \leq \kappa \leq 0.68$, $\chi^2_{df=1} = 134.42 > \chi^2_{krit, df=1} = 3.84$ für $\alpha = 0.05$). Zu beachten ist hierbei jedoch, dass aufgrund der geringen Anzahl der Kategorien und der häufigen Übereinstimmung beider Beurteiler in der Kategorie 1 Cohens κ anfällig gegen Abweichungen ist, wie bereits in der Vorstudie ausgeführt wurde.

Die Werte für die Beurteilerübereinstimmungen in den einzelnen Schritten kennzeichnen das Verfahren auch in der Hauptstudie als reliabel. Für die Einschätzung der Validität gelten die gleichen Bedingungen und Aussagen wie in der Vorstudie.

4.4.1 Nicht relevante Elemente (FF 1a)

Die Kategorien 1 und 4 werden hier wiederholt kurz definiert. Danach erfolgt eine zusammenfassende Darstellung der genannten Elemente in den jeweiligen Kategorien aus einer fachlichen Perspektive. Alle diese Elemente sowie auf sie verweisende (Meta-)Beziehungen können in den Tabellen 4.4 und 4.5 gefunden werden.

Die Kategorie 1 beinhaltet solche Elemente, die in dem Phänomen erkannt bzw. unmittelbar aus der Alltagserfahrung abgeleitet werden und begrifflich näher an alltäglichen Diskursen verortet werden können, die jedoch nicht relevant für die Erklärung des gezeigten Phänomens sind. In die Kategorie 4 werden Elemente eingeordnet, die aus dem Physiklernen oder allgemeiner aus dem Lernen von Naturwissenschaften erinnert werden und die begrifflich näher an den entsprechenden fachspezifischen Diskursen angesiedelt sind. Für das Phänomen A (‘Laserstrahl’) werden Elemente benachbarter Kon-

zepte (z.B. das Wellen- oder Teilchenkonzept von Licht) als relevant angesehen, für die Phänomene B 'Münze' und C 'Bleistift' nicht, da in diesen beiden Fällen eine Erklärung mit Hilfe des Wellen- oder Teilchenkonzepts aus fachlicher Perspektive ungeeignet ist (siehe Anhänge B und C).

Insgesamt fallen 61 Elemente in die Kategorien 1 (13 Elemente) oder 4 (48 Elemente). Davon stammen 57 aus Erklärungen von Studierenden und 4 aus denen von Experten.

In der Kategorie 1 ist die häufige Verwendung des Begriffs der „optischen Täuschung“ (a04-A, co1-C, eo4-C, fo2-C, ho3-A, ho3-C, auch: „Illusion“ in jo4-C) auffällig. Diese Bezeichnung tritt für die gezeigten Phänomene des gebrochenen Laserstrahls (A) und des geknickten Bleistifts (C) auf. Des Weiteren können in der Kategorie 1 die Elemente „Laser“ (in der Erklärung do2-B), „Münze“ (jo4-C) sowie „Münze“ und „Münzenstapel“ (xo3-C) gefunden werden, die sich jeweils auf ein anderes der gezeigten Phänomene beziehen und somit für das eigentlich zu erklärende Phänomen mit 'nicht relevant' kodiert wurden. In ho2-C werden ein weiterer (fiktiver) „Bleistift“ in einer (ebenfalls fiktiven) „Hand“ sowie ein „Teil“ dieses Bleistifts genannt, anhand dessen das Bild der gleichen Konfiguration vorhergesagt wird, allerdings für einen Betrachter unter Wasser. Diese Situation stellt ein anderes Phänomen dar und wird daher ebenfalls nicht als relevant kodiert.

Der Kategorie 4 werden in den Erklärungen zu den Phänomenen B und C häufig Elemente benachbarter Konzepte (Teilchen- und Wellenkonzept) zugewiesen, weil sie zwar bedeutsam für die Einordnung der Brechung in das Strahlenkonzept sind, nicht jedoch als relevant zur Erklärung der gezeigten Hebungsphänomene betrachtet werden. Dementsprechend tauchen in dieser Kategorie Elemente des Wellenkonzepts auf: „Wellennatur“ (a01-B), „Wellencharakter“ (a02-B), „Lichtwellen“ (fo2-C), „Elementarwellen“ und deren „Wellenfronten“ (jo1-C). Weiterhin können in dieser Kategorie Elemente des Teilchenkonzepts („Lichtphotonen“, bo1-C) und der Feldtheorie der Elektrodynamik („Dielektrizitätskonstante“, „Stetigkeitsbedingungen“, „elektromagnetische Felder“ und deren „Eigenschaften“, „Maxwellgleichungen“ und deren „Folgerungen“, eo1-C) gefunden werden. Genannt werden ebenfalls das „Fermatsche Prinzip“ sowie diesem Prinzip zugeordnete Elemente wie z.B. „optische Weglänge“, „(andere) Zeit“ und „zeitlich kürzester Weg“ (a02-B, co2-B, co2-C, do1-B, do2-B, fo1-B), „Produkt“ (fo1-B) sowie „Geschwindigkeit“ (co2-C, eo2-C).

Neben diesen benachbarten Konzepten und Theorien treten Elemente der optischen Reflexion auf, die zwar dem Strahlenkonzept entstammen, jedoch nicht für die Erklärung der gezeigten Phänomene relevant sind (do3-B), sowie Grenzfälle, die für die Erklärung ebenfalls nicht bedeutsam sind: „Vakuumlichtgeschwindigkeit“ (a01-B), „Vakuum“ (jo1-C), „(senkrechter) unveränderlicher Fall“ (xo1-B, xo1-C). Außerdem werden in der Kategorie 4 Eigenschaften der beteiligten Medien genannt, die für die Einordnung der Brechung im Strahlenkontext bzw. für die Erklärung der scheinbaren Hebung oder Knickung nicht relevant sind, wie etwa die „Stoffdichte“ (nicht relevant für Hebung) in a03-B, die „Durchlässigkeit“ (a04-A), „Temperatur“ (hat im vorliegenden Fall keinen Einfluss), „Luftfeuchte“ (hat im vorliegenden Fall ebenfalls keinen Einfluss) sowie die „Zusammensetzung“ (do4-A, Begriff unkonkret) der beteiligten Medien. In der Erklärung eo2-C tauchen das Bauelement „Linse“ (ist zwar als 'Augenlinse' relevant, nicht jedoch in dem hier verwendeten Kontext), deren Brechungsindex und

Tabelle 4.4: Übersicht über die Elemente in den Kategorien 1 und 4 sowie über von die von diesen Elementen abhängigen (Meta-)Beziehungen (Teil 1)

ERKLÄRUNG	ID	LABEL	CODE	ABHÄNGIGE (META-)BEZ.
ao1-B	6	Wellennatur	4	e4, e5
	11	Vakuumslichtgeschwindigkeit	4	e12
ao2-B	2	Wellencharakter	4	e1, m1
	10	geringste Zeit	4	e8, m2, m3, m7, m8
ao3-B	11	Fermatsches Prinzip	4	m2
	5	Stoffdichte (Wasser)	4	e5, e6, e7
ao4-A	6	Stoffdichte (Luft)	4	e4, e6, e7
	10	optische Täuschung	1	e9, m3
bo1-C	15	Durchlässigkeit	4	e13, m4
	7	Lichtphotonen	4	e7
co1-C	9	optische Täuschung	1	m3
co2-B	17	Zeit	4	e12, m10
	19	Fermatsches Prinzip	4	m11, m12
co2-C	21	kürzeste optische Weglänge	4	m11
	1	Geschwindigkeit (1, in Wasser)	4	e1, m1, e3, m3
	2	Geschwindigkeit (2, in Luft)	4	e2, m2, e3, m3
	6	andere Zeit	4	e4, m3, m4, m5
	9	Fermatsches Prinzip	4	m19
	11	optische Weglänge	4	e8, e9
co3-C	11	andere Brechung	4	e10, m11, m7, m8
do1-B	5	Fermatsches Prinzip	4	korrr
do2-A	30	Herleitung	4	e23, e24, e25
do2-B	11	Laser	1	e6
	15	Fermatsches Prinzip	4	m4, e10, m11
	16	zeitlich kürzester Weg	4	e12, m4
	20	Geschwindigkeiten	4	e15, m8, m7, m9
	27	Licht (eines Lasers)	4	e11, e5
	25	Aufspaltung (des Lichts)	4	e17, e21, e22
do3-B	26	reflektierter Anteil (1)	4	e21
	31	erneute Auftretung (der Aufspaltung)	4	e22, e24
do4-A	14	Temperatur	4	-
	15	Luftfeuchte	4	-
	16	Zusammensetzung	4	-
	6	Dielektrizitätskonstante	4	e3
eo1-C	14	Stetigkeitsbedingungen	4	e11, m10, e14, e13
	15	elektromagnetische Felder	4	e12, e16, m11, m10
	19	Folgerung	4	e14, m12
	20	Maxwellgleichungen	4	e15, m13
eo2-C	21	Eigenschaften	4	e15, e16, m13
	14	Linse	4	e18, m4
	15	Brechungsindex (der Linse)	4	e18
	16	Bild (durch die Linse)	4	e19
	11	Geschwindigkeit (1)	4	e15, e13, e16, m2, m7
	12	Geschwindigkeit (2)	4	e15, e14, e17, m3, m7
eo4-C	4	optische Täuschung	1	m2, m3, m4, m5
fo1-B	7	kürzester optischer Weg	4	e5, m2, m4, m6
	4	Produkt	4	e3, e4
fo2-B	10	Lichtwellen	4	e10, m6, m8
fo2-C	6	optische Täuschung	1	e7, m1, m2
	8	Lichtwellen	4	e9, e10, m3

Tabelle 4.5: Übersicht über die Elemente in den Kategorien 1 und 4 sowie über von die von diesen Elementen abhängigen (Meta-)Beziehungen (Teil 2)

ERKLÄRUNG	ID	LABEL	CODE	ABHÄNGIGE (META-)BEZ.
ho2-C	3	reine Physik	4	e2, m6
	18	Bleistift (2)	1	e21, e17
	19	Hand	1	m9
	20	Teil (von Bleistift (2))	1	e18, e19
	21	Lichtstrahlen (von Bleistift (2))	4	e22, e21
ho3-A	9	optische Täuschung	1	e12, m6
ho3-C	9	optische Täuschung	1	e9, m3
jo1-C	3	Vakuum	4	m1, m2
	12	Wellenfront	4	e13, m7, e10, e11, m5, m12
	13	Elementarwellen	4	e11
	14	erste Elementarwellen	4	e12, m12, m6
	15	Zeit	4	e12, m12, m6
	16	letzte Elementarwellen	4	m6
jo4-C	10	Illusion	1	e6, m4
	23	Münze	1	e17
xo1-B	38	unveränderlicher Fall	4	m17
xo1-C	29	senkrechter unveränderlicher Fall	4	m10
xo3-C	17	Münze(n)	1	m4
	18	Münzenstapel	1	e22, m3, m5

das durch sie wahrnehmbare Bild auf. Diese Elemente stehen zwar zur Brechung mit dem gezeigten Phänomen in einem Zusammenhang, sind jedoch für die Erklärung des Phänomens im vorliegenden Fall nicht relevant. Weitere Elemente dieser Kategorie müssen einem der anderen gezeigten Phänomene zugeordnet werden („Licht“ eines Lasers in der Erklärung der scheinbar gehobenen Münze, do2-B) oder hypothetischen Situationen, die jedoch nicht zur Erklärung der gezeigten Phänomene dienen („Lichtstrahlen“ eines fiktiven Bleistifts, ho2-C). Schließlich gibt es Elemente, die sich auf einen nicht relevanten mathematischen Zusammenhang („Herleitung“, do2-A) beziehen oder die nicht zugeordnet werden können („reine Physik“, ho2-C).

Zusammengefasst können die Kategorien 1 und 4 auf Basis der Erklärungen wie folgt beschrieben werden: Die Kategorie 1 enthält das Element der optischen Täuschung sowie Elemente anderer gezeigter Phänomene. Die Kategorie 4 beinhaltet Elemente benachbarter Konzepte und Theorien, nicht relevante Eigenschaften der beteiligten Medien, Begriffe, die der Reflexion von Licht zuzuordnen sind, sowie vereinzelt Elemente aus anderen Zusammenhängen.

4.4.2 Fehlende zentrale Elemente (FF 1b)

Fehlende zentrale Elemente für das Phänomen A - 'Laserstrahl'. Im Anhang A (Physikalische Grundlagen) werden acht zentrale Elemente festgelegt. Dabei stellen sich vor allem in dem Foto zum Phänomen A - 'Laserstrahl' erkennbare Bestandteile der Strahlenskizze zum Brechungsgesetz sowie das 'Brechungsgesetz' selbst mit den beteiligten Brechungsindizes als zentral heraus, ebenso 'Licht' als allgemeiner, übergeordneter Begriff. 'Winkel' dagegen werden nicht als besondere Elemente angesehen, da die Beschreibung des Verhaltens von Licht an Grenzflächen auch qualitativ als *hin zum* bzw. *weg vom* Lot beschrieben werden kann und in dieser häufig verwendeten sprachlichen Beschreibung die Winkel zumindest nicht explizit benannt werden. Daraus folgt jedoch ausdrücklich nicht, dass die Winkel nicht relevant sind, weshalb sie in die Kategorie 3 aufgenommen werden. Folgende Synonyme wurden für die Auswahl berücksichtigt: Laserstrahl, Lichtbündel, Lichtstrahl, Laser (alle für 'Strahl'), Oberfläche, Wasseroberfläche, Übergang (für 'Grenzfläche') sowie Brechzahl, n (für 'Brechungsindex').

Tabelle 4.6: Übersicht über die Verwendung zentraler Elemente in den Maps zum Phänomen A - 'Laserstrahl'

Erklärung	Strahl	Licht	Grenz-/Wasser- oberfläche	Luft	Wasser	Brechungs- gesetz	Brechungs- index	Lot	Summe
ao1-A	1	1	1	1	1	1	1	1	8
ao2-A	1	1	1	1	1	0	1	0	6
ao3-A	1	0	1	1	1	0	1	1	6
ao4-A	1	1	0	1	1	0	1	0	5
bo1-A	1	1	1	1	1	1	1	0	7
bo2-A	1	1	1	1	1	1	1	0	7
bo3-A	1	1	1	1	1	0	1	1	7
do1-A	1	1	0	1	1	0	1	0	5
do2-A	1	1	0	1	1	1	0	0	5
do3-A	1	0	1	1	1	1	1	1	7
do4-A	1	1	1	1	1	0	1	1	7
eo1-A	1	1	1	1	1	0	1	1	7
eo2-A	1	0	1	1	1	0	0	0	4
eo4-A	1	0	1	1	1	0	1	1	6
go1-A	1	1	1	1	1	1	1	0	7
go2-A	1	0	1	1	1	0	1	0	5
ho1-A	1	1	1	1	1	0	0	0	5
ho2-A	1	0	1	1	1	0	1	1	6
ho3-A	1	0	0	1	1	0	1	0	4
xo1-A	1	1	1	1	1	1	1	1	8
xo2-A	1	1	1	0	0	1	1	1	6
xo3-A	1	1	1	1	1	1	0	1	7
Summe	22	15	18	21	21	9	18	11	

In den 22 Maps zu diesem Phänomen wurde das Element 'Strahl' immer identifiziert. Fast immer tauchen die Elemente 'Luft' und 'Wasser' (21-mal, alle außer xo2-A). Seltener treten die Elemente 'Brechungsgesetz' (neunmal), 'Lot' (elfmal) sowie 'Licht' (15-mal) auf. Von den 22 Maps enthalten zwei alle der acht zentralen Elemente (ao1-A, xo1-A), das Minimum sind vier genannte zentrale Elemente (eo2-A, ho3-A). Eine Übersicht über die fehlenden zentralen Elemente in Erklärungen des geknickten Laserstrahls stellt die Tabelle 4.6 dar.

Tabelle 4.7: Übersicht über die Verwendung zentraler Elemente in den Maps zu den Phänomenen B und C - 'Münze' und 'Bleistift'

Erklärung	Phänomen	Beobachter	Grenz-/Wasser- oberfläche	Objekt	Bild	Strahlen	Wasser	Luft	Summe
ao1-B	b	1	1	1	o	1	1	1	6
ao2-B	b	1	1	1	o	1	1	1	6
ao3-B	b	o	1	1	o	1	1	1	5
ao4-B	b	1	o	1	o	o	1	1	4
bo1-C	c	1	o	1	1	1	o	o	4
bo2-C	c	1	1	1	1	1	1	1	7
bo3-C	c	1	1	1	1	1	1	o	6
co1-B	b	1	o	1	o	1	1	1	5
co1-C	c	o	1	1	o	1	1	o	4
co2-B	b	1	1	1	o	1	1	1	6
co2-C	c	1	1	1	o	1	1	1	6
co3-B	b	1	o	1	1	1	1	1	6
co3-C	c	1	o	1	1	1	1	o	5
co4-B	b	1	1	1	o	1	1	o	5
co4-C	c	o	1	1	o	1	1	o	4
do1-B	b	1	1	1	o	1	1	1	6
do2-B	b	1	1	1	o	1	o	o	4
do3-B	b	1	1	1	o	1	1	1	6
do4-B	b	1	1	1	o	1	1	1	6
eo1-C	c	1	1	1	o	1	o	o	4
eo2-C	c	1	o	1	1	1	1	1	6
eo4-C	c	1	1	1	o	1	1	1	6
fo1-B	b	1	1	1	1	1	1	1	7
fo1-C	c	1	1	1	o	1	1	o	5
fo2-B	b	o	1	1	o	o	1	o	3
fo2-C	c	o	1	1	o	o	1	o	3
go1-B	b	o	1	o	1	1	1	o	4
go2-B	b	o	1	1	o	1	1	o	4
ho1-C	c	1	1	1	1	1	1	o	6
ho2-C	c	1	1	1	1	1	1	1	7
ho3-C	c	1	o	1	o	1	1	1	5
jo1-B	b	1	1	1	o	1	1	1	6
jo1-C	c	1	1	1	o	1	1	1	6
jo2-B	b	1	1	1	o	1	1	1	6
jo2-C	c	1	1	1	1	1	1	1	7
jo4-B	b	1	1	1	o	1	1	1	6
jo4-C	c	1	1	1	o	1	1	1	6
xo1-B	b	1	1	1	1	1	1	1	7
xo1-C	c	1	1	1	1	1	1	1	7
xo2-C	c	1	1	1	1	1	1	1	7
xo3-B	b	1	1	1	o	1	1	1	6
xo3-C	c	1	1	1	o	o	1	o	4
Summe		35	35	41	14	38	39	27	

Fehlende zentrale Elemente für die Phänomene B und C - 'Münze' und 'Bleistift'. Für die Maps zu den Erklärungen der Phänomene B und C werden sieben Elemente auf Basis der 'Physikalischen Grundlagen' im Anhang als zentral festgelegt: Beobachter, Grenzfläche, Objekt, Bild, Strahlen, Luft, Wasser. Einbezogen werden neben diesen Elementen auch folgende Synonyme: Betrachter, Auge, man (für 'Beobachter'), Oberfläche, Wasseroberfläche (für 'Grenzfläche'), Gegenstand, Münze, Stift (für 'Objekt') sowie Lichtstrahlen, Lichtbündel (für 'Strahlen').

Das Element 'Objekt' wird in 41 der 42 Maps genannt (außer go1-B), fehlt also besonders selten. Weniger häufig tauchen 'Wasser' (39-mal) und 'Strahlen' (38-mal) auf, seltener 'Luft' (27-mal) und noch seltener das 'Bild' des scheinbar gehobenen Objekts (14-mal). Das 'Bild' ist damit das am häufigsten fehlende Element. Der Beobachter als zentrales Element wird 35-mal genannt. Alle sieben Elemente sind in sieben kCMs vorhanden (bo2-C, fo1-B, ho2-C, jo2-C, xo1-B, xo1-C, xo2-C), und somit viermal in Studierenmaps, dreimal in Expertenmaps. Das Minimum liegt bei drei der zentralen Elemente (fo2-B, fo2-C). Eine Übersicht über die Verwendung zentraler Elemente findet sich in Tabelle 4.7.

4.4.3 Fehlerhafte Beziehungen (FF 2)

Im Folgenden werden inkorrekte Beziehungen strukturiert nach dem gezeigten Phänomen sowie nach der jeweils vordergründig zur Ablehnung der jeweiligen Beziehung herangezogenen Regel gemäß dem Kodiermanual dargestellt. Dabei bilden diese Regeln weder streng kriteriengeleitet definierte Kategorien noch sind diese Kategorien disjunkt. Stattdessen werden sie als Orientierungshilfen verwendet. Beziehungen, die durch Widerlegung anderer Beziehung ebenfalls als inkorrekt bewertet werden (Folgefehler), sind in diese inhaltliche Analyse nicht einbezogen, da auf sie jeweils die gleichen Aussagen zutreffen wie auf die als inkorrekt bewerteten, zugrundeliegenden Beziehungen.

In der Analyse wird davon gesprochen werden, dass sowohl Aussagen als auch Beziehungen inkorrekt sind. Dabei sollen diese Begriffe nicht als Synonyme füreinander verstanden werden, sondern entsprechen weiter den für Concept Maps typischen Termini. Der jeweilig als inkorrekt bewertete Aspekt einer Aussage oder Beziehung wird im Folgenden kursiv gekennzeichnet und sinngemäß unter Verweis auf die Erklärung wiedergegeben.

Nicht jede Bewertung als 'inkorrekt' kann hier aus ökonomischen Gründen begründet werden, es werden stattdessen nur einige Bewertungen begründet, die anfällig für etwaige Missverständnisse sind. Für das Verständnis fachphysikalischer Zusammenhänge und Prinzipien kann im Allgemeinen der Anhang A 'Physikalische Grundlagen' dieser Arbeit zu Hilfe genommen werden, für einige weitere ausgewählte Fehler werden in der Diskussion der folgenden Ergebnisse Vorschläge für Korrekturen gemacht.

Inkorrekte Beziehungen in den Erklärungen zum gebrochenen Laserstrahl. In den Erklärungen zum Phänomen des gebrochenen Laserstrahls kann eine ganze Reihe von Beziehungen identifiziert werden, die einen Verstoß gegen fachlich etablierte Zusammenhänge und Prinzipien darstellt. Diese Verstöße

betreffen vor allem das Brechungsgesetz und das Fermatsche Prinzip. So werden in Bezug auf das Brechungsgesetz die Indizes der Brechzahlen bzw. Winkel (a01-A) und das größenmäßige Verhältnis der Brechzahlen von Luft und Wasser (e04-A, h02-A) vertauscht oder die zahlenmäßige Angabe der Brechzahl von Wasser falsch eingeschätzt (h03-A). Im Rahmen des Fermatschen Prinzips wurden Aussagen zurückgewiesen, in denen behauptet wird, Licht würde den *kürzesten Weg* zurücklegen (g01-A) oder der *Weg* benötige die geringste Zeit (a02-A, korrekt: *Licht* benötigt für diesen Weg die geringste Zeit). In h01-A wird die Beziehung zurückgewiesen, Phasenfronten würden sich *senkrecht* zur Ausbreitungsrichtung *bewegen* (sie *verlaufen* senkrecht zu den Flächen gleicher Phase oder sie bewegen sich in der Ausbreitungsrichtung).

Daneben treten mehrere Formulierungen auf, die nicht grundsätzlich gegen einen fachlich etablierten Zusammenhang oder gegen ein physikalisches Prinzip verstoßen, jedoch Beziehungen darstellen, deren Formulierung aus fachlicher Perspektive so nicht haltbar ist. Zurückgewiesen wurden Aussagen, die behaupten, Lichtstrahlen würden sich *bewegen* (a02-A, a03-A) oder in denen brechende Eigenschaften dem Medium selbst zugesprochen wurden anstelle der Grenzfläche (b01-A), beziehungsweise die für die Brechung maßgeblichen Eigenschaften beträfen die Durchlässigkeit des Mediums für Licht (a04-A). Laut h03-A verändere sich der Einfallswinkel, der aufgrund der feststehenden Konstellation von Laser und Aquarium jedoch konstant bleibt. Eine Konfusion der Ursachen für das Entstehen des Bildes des Laserstrahls liegt in a01-A vor, wo davon gesprochen wird, dass für einen Beobachter eine Brechung an der Vorderseite des Aquariums deshalb nicht auftritt, weil die Blickrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls orientiert ist. Diese Anordnung ist für die nicht auftretende Brechung jedoch nicht bedeutsam, sondern das Verhältnis von Blickrichtung und vorderer Grenzfläche. Inkorrekt ist in e01-A die Formulierung, die Flächennormale habe einen Winkel (der sich bei der Brechung ändert), da der die Normale zur Oberfläche kennzeichnende Winkel gerade konstant und rechtwinklig bleibt, allerdings der an die Normale anliegende Winkel zum Laserstrahl auf beiden Seiten der Grenzfläche unterschiedlich ist. In d02-A wird durch Verwendung des Genitivs („Lichtstrahl des Lasers“) nahegelegt, der Laser besäße einen Lichtstrahl, wohingegen der austretende Laserstrahl sich wie ein Lichtstrahl verhält. Für d02-A wird eine Beziehung zurückgewiesen, die nahelegt, die Herleitung des Brechungsgesetzes könne *bewiesen* werden und in e02-A muss die Aussage, dass das, was der Beobachter als Laserstrahl wahrnehme, *in Wirklichkeit* eine Lichtwelle sei, ebenfalls als inkorrekt angesehen werden.

In einigen Erklärungen werden ungeeignete (physikalische) Konzepte zur Erklärung bzw. Beschreibung des gezeigten Phänomens verwendet. In d01-A wird davon gesprochen, dass sich elektromagnetische Wellen mit der geometrischen Optik beschreiben ließen, die aber eben keine Wellen, sondern nur deren Ausbreitungsrichtungen unter bestimmten geometrischen Vorannahmen beschreibt. In d03-A wird die Aufteilung von Licht in einen reflektierten und einen gebrochenen Anteil dem Brechungsgesetz zugeschrieben, das darüber jedoch keine Aussage macht. In der erstellten Erklärung wird zuvor nur das Brechungsgesetz genannt und in Bezug auf besagte Aufteilung wird dann von *dem* Gesetz gesprochen. Üblicherweise wird die Aufteilung in einen reflektierten und einen gebrochenen Anteil nur

im Rahmen von Stetigkeitsbedingungen elektromagnetischer Felder an Grenzflächen beschrieben.

Sowohl in a04-A als auch in h03-A wird das Abknicken des Laserstrahls als optische Täuschung bezeichnet, was als physikalische Fehlinterpretation der Wahrnehmung gedeutet werden muss. Und schließlich wird in d02-A die Aussage zurückgewiesen, der Verlauf des Lichtstrahls sei zu *erkennen*. Hier werden der (durch Streuung) erkennbare Laserstrahl und die fiktionale Entität des Lichtstrahls in Bezug auf die Wahrnehmbarkeit verwechselt.

Alle hier aufgezeigten inkorrekten Beziehungen liegen bis auf eine Ausnahme im Theoriebereich (15 Beziehungen) oder vermitteln zwischen Elementen der Theorie und des Phänomens (22 Beziehungen). Insgesamt müssen also 38 Beziehungen als nicht haltbar zurückgewiesen werden. Dabei handelt es sich vor allem um Formulierungen physikalischer Zusammenhänge, die aus fachlicher Perspektive nicht haltbar sind, oder um klare Verstöße gegen etablierte Gesetzmäßigkeiten und Prinzipien der Physik, die vor allem das Brechungsgesetz und das Fermatsche Prinzip betreffen. Daneben treten einige ungünstige Verwendungen physikalischer Konzepte (Wellenkonzept, Reflexion, Felder) auf sowie Fehlinterpretationen der Wahrnehmung des geknickten Laserstrahls als optische Täuschung und eine Beziehung, die die Wahrnehmung hypothetischer Entitäten erlaubt.

Inkorrekte Beziehungen in den Erklärungen zur scheinbar gehobenen Münze. In den Erklärungen zum Phänomen der scheinbar gehobenen Münze können vielfach Aussagen gefunden werden, die einen zu stark vereinfachten Zusammenhang darstellen. Diese Aussagen führen das gezeigte Phänomen im Wesentlichen allein auf den Begriff 'Brechung' von Licht zurück. Ohne dass dabei der Beobachter, die Münze, ihr Bild und die räumliche Anordnung der Medien und die Brechung von Lichtstrahlen in ein Verhältnis gesetzt werden, ist die Nennung des Begriffs bzw. das Auftreten des theoretischen Vorgangs 'Brechung' jedoch keine hinreichende Erklärung. Die gefundenen unzulässigen Vereinfachungen unterscheiden sich darin, wie stark der Zusammenhang vereinfacht wurde. In einigen Erklärungen wird die scheinbare Hebung der Münze nur auf den Begriff der Brechung oder auf das Brechungsgesetz zurückgeführt (a01-B, c01-B, d03-B, f02-b, g02-B).

In anderen Erklärungen tritt konkret die Beziehung des Brechungswinkels zum Einfallswinkel hervor (a02-B, a03-B, j04-B), ohne jedoch zu explizieren, welche Rolle diese Winkel in der vorgegebenen Konstellation spielen. In einem Fall wird die Brechung hin zum Lot bei Eintritt des Lichts in das Wasser, also noch bevor es auf die Münze fällt, als ursächlich für die scheinbare Lageveränderung genannt (c04-B). In d02-B wird die Aussage zurückgewiesen, nach Betrachtung der Brechung handele es sich bei der optischen Hebung der Münze nur noch um ein *geometrisches Problem*. Zwar werden hier im weiteren Verlauf der Betrachtung und der Einblickwinkel in die Erklärung einbezogen, das Verhältnis von Objekt, Bild und Beobachter jedoch nicht expliziert, sondern eben nur als geometrisches Problem bezeichnet. In c02-B wird die Verlängerung der gebrochenen Lichtstrahlen durch das Gehirn in der Erklärung explizit berücksichtigt und deshalb die Rückführung der scheinbaren Verschiebung der Münze auf die Brechung als korrekt gewertet. Hier wird allerdings ein Teilaspekt zu stark vereinfacht: Die Verlängerung des (gebrochenen) Strahls durch das Gehirn bewirkt, dass die Münze weiter hinten zu

liegen scheint. Tatsächlich wird das Bild der Münze gehoben und dem Betrachter entgegengerückt. Die Bezeichnung 'weiter hinten' kommt dadurch zustande, dass das Becken flacher erscheint (vgl. Erklärung x03-B) und die Position der Münze nur relativ zu dieser 'scheinbaren' Geometrie des Beckens weiter hinten wahrgenommen wird. Alle zu stark vereinfachten Aussagen dieser Art beinhalten Beziehungen, die direkt oder indirekt zwischen Elementen des Phänomens und der Theorie vermitteln.

In mehreren Erklärungen treten nicht haltbare Formulierungen physikalischer Zusammenhänge und Konzepte auf: In a02-B würden sich Lichtstrahlen *bewegen*; a03-B behauptet, die unterschiedliche Stoffdichte *definiere* die Brechzahl des Übergangs; im c01-B würde das Licht *durch* das Brechungsgesetz gebrochen; in j02-B findet man, dass Lichtstrahlen die Münze durch die Brechung trafen und auch Lichtstrahlen *verschoben* würden. Der Erklärung f01-B zufolge fällt ein Lichtstrahl *komplett gebrochen* auf die Münze. In d04-B sieht es für den Beobachter so aus, als wäre die durch das Brechungsgesetz beschriebene Winkelbeziehung genau *umgekehrt*. Licht würde c03-B zufolge durch den höheren Brechungsindex von Wasser *anders gebrochen*. In der Erklärung c02-B *benötige* das Brechungsgesetz einen Brechungsindex und in c02-B durchliefen Lichtstrahlen im *rechten* Teil der Abbildung (Münze im Wasser) nur Luft. Diese nicht haltbaren Beziehungen liegen sowohl im Theoriebereich als auch zwischen Elementen der Theorie und des Phänomens.

In einigen Fällen wird direkt gegen fachlich etablierte Zusammenhänge oder Prinzipien verstoßen, wie etwa in a01-B, indem dort im Rahmen des Brechungsgesetzes die Indizes der Brechzahlen (oder der Winkel) vertauscht wurden. In a02-B und f01-B betreffen die fehlerhaften Beziehungen das Fermatsche Prinzip. In f01-B würde der optische Weg *möglichst senkrecht* zur Wasseroberfläche stehen und in a02-B benötigt der Weg anstelle des Lichts die kürzeste Zeit. Diese Verstöße liegen ebenfalls sowohl im Theoriebereich als auch zwischen Elementen der Theorie und des Phänomens.

Außerdem gibt es mehrere Aussagen, in denen ungeeignete (physikalische) Konzepte als Ursache oder Zusammenhang verwendet werden. So wird j01-B zufolge Licht *gebeugt*. In a04-B wird behauptet, die Luft ließe das Objekt *nur halb* erscheinen. Schließlich wird in c02-B noch irrtümlich davon gesprochen, das Auge könne Lichtstrahlen *sehen*. Diese Aussagen liegen entweder im Phänomenbereich oder zwischen Elementen des Phänomens und der Theorie.

Zusammenfassend kann damit belegt werden, dass viele Beziehungen deswegen als inkorrekt bewertet wurden, weil sie nur die Brechung oder die im Brechungsgesetz auftauchenden Winkel als ursächlich für die optische Hebung der Münze erachten. Diese Verkürzung tritt in unterschiedlichen Qualitäten auf. Einige Formulierungen beinhalten Beziehungen physikalischer Zusammenhänge, die so nicht haltbar sind, aber nicht eindeutig gegen ein etabliertes Prinzip verstoßen. Solche Verstöße, namentlich gegen das Brechungsgesetz und das Fermatsche Prinzip, können allerdings in anderen Aussagen gefunden werden.

Überdies wird mit der Beugung von Licht noch ein ungeeignetes physikalisches Konzept zur Erklärung des gezeigten Phänomens verwendet und es wird die Aussage getroffen, man könne hypothetische Entitäten wie Lichtstrahlen wahrnehmen. Während alle verkürzten Aussagen direkt oder indirekt Elemente des Phänomens und der Theorie miteinander verbinden, können die übrigen inkorrekten

Beziehungen sowohl innerhalb oder ebenfalls zwischen diesen Bereichen gefunden werden.

Inkorrekte Beziehungen in den Erklärungen zum scheinbar geknickten Bleistift. Der scheinbare Knick im Bleistift wird mehrfach in unzulässiger Weise verkürzt auf die Brechung zurückgeführt, wobei diese Verkürzung unterschiedlich stark ausfällt. So werden in bo1-C, co3-C, co4-C, fo2-C und jo2-C *die Brechung*, die *Brechungsgesetze* oder das *gebrochene Licht* reduktionistisch für den scheinbaren Knick verantwortlich gemacht, in co3-C (zusätzlich) und ho3-C sind es die Brechungsindizes und in bo1-C, bo3-C, co1-C, ho2-C und jo4-C die Veränderung der Winkel(-beziehung) bezüglich der Wasseroberfläche, des Lotes oder bezüglich der Einfallsrichtung in das Auge.

Weiterhin können einige wahrnehmungsbezogene Fehlinterpretationen gefunden werden. So wird in bo1-C das Bild des Bleistifts als *verzerrt* dargestellt, in co2-C der untere Teil des Bleistifts als *nach hinten verschoben* oder die Erscheinung insgesamt als (*optische*) *Täuschung* oder *Illusion* bezeichnet (eo4-C, fo2-C, ho2-C, ho3-C, jo4-C).

Nicht haltbare Formulierungen physikalischer Zusammenhänge liegen in Form verschiedener Aussagen vor: Lichtstrahlen würden sich *bewegen* (bo2-C), die optische Achse sei die Wasseroberfläche (bo3-C), der Strahlengang würde im wassergefüllten Becken *optimiert* (co2-C), der Knick im Bleistift entspräche dem Knick eines Lichtstrahls bei der Brechung (ho1-C, jo1-C), optische Täuschungen können auf verschiedene Brechungsindizes zurückgeführt werden (eo4-C) und das verzerrte Bild einer Linse stelle sich in diesem Fall (des gezeigten Phänomens) als Knick heraus (eo2-C).

Darüber hinaus gibt es mehrere Verstöße gegen etablierte physikalische Gesetzmäßigkeiten und Prinzipien. In bo3-C wird das Licht beim Austritt aus dem Wasser irrtümlich als *hin zur optischen Achse* gebrochen bezeichnet, statt, in diesem Fall, weg von ihr. Eine ähnliche Konfusion der Winkel von Lichtstrahlen zum Lot bei der Brechung kann in eo1-C gefunden werden. In co3-C wird die Brechung *im Wasser*, statt an dessen Oberfläche verortet und in eo4-C die Brechung als Ursache für optische Täuschungen benannt.

Außerdem werden noch die Beugung (ho2-C, jo1-C) sowie Elementarwellen (jo1-C) in einen Zusammenhang mit dem gezeigten Phänomen gebracht, was als Verwendung ungeeigneter Konzepte gewertet wurde. Und schließlich wird in einer Erklärung des Phänomens des scheinbar geknickten Bleistifts davon gesprochen, ein Beobachter könne Lichtstrahlen wahrnehmen (bo2-C).

Im Überblick über die Erklärungen zu diesem Phänomen kann eine große Vielfalt in der Art der fehlerhaften Beziehungen festgestellt werden, wobei zu stark vereinfachte Aussagen in unterschiedlicher Qualität einen Schwerpunkt solcher Fehler bilden. Diese Fehler liegen allesamt zwischen Elementen des Phänomens und der Theorie. Auch mehrere Fehlinterpretationen der Wahrnehmung treten in den Erklärungen auf. Dem Brechungsgesetz wird mehrfach durch Konfusion der Richtungsänderung bei der Brechung widersprochen und vereinzelt werden benachbarte, ungeeignete physikalische Konzepte in die Erklärung eingebunden. Diese inkorrekten Beziehungen liegen verteilt innerhalb und zwischen den Bereichen Phänomen und Theorie, wobei der Zusammenhang des Phänomens mit dem Begriff der optischen Täuschung außer in der Erklärung ho3-C innerhalb des Phänomenbereichs liegt.

Fehlerhafte Beziehungen in Propositionen aus phänomenübergreifender Sicht Vergleicht man inkorrekte Beziehungen in den Erklärungen der drei gezeigten Phänomene, so fällt auf, dass in den Erklärungen des gebrochenen Laserstrahls vor allem Verstöße gegen fachlich etablierte Prinzipien und Zusammenhänge sowie unsachgemäße Formulierungen von physikalischen Zusammenhängen dominieren, während Erklärungen, die die Phänomene der scheinbaren Hebung betreffen, vor allem zu stark vereinfachte Aussagen enthalten. Weiterhin treten hier auch verstärkt wahrnehmungsbezogene Fehlinterpretationen auf, sodass die Beschreibung der Fehler in den Erklärungen zur scheinbar gehobenen Münze und zum scheinbar geknickten Bleistift mannigfaltiger ist. Die Bezeichnung des jeweils gezeigten Phänomens als ‘optische Täuschung’ tritt phänomenübergreifend auf, genauso wie die Wahrnehmung hypothetischer Entitäten (‘Lichtstrahlen’) und die Verwendung ungeeigneter physikalischer Konzepte. Außerdem kann festgestellt werden, dass es in einigen Fällen die Formulierungen der Beziehungen sind, deretwegen die Beziehungen als inkorrekt gewertet werden, in anderen Fällen ist jedoch die Formulierung der Beziehung an sich korrekt, sie verweist dann aber auf ein falsches Quellen- oder Zielelement.

Schließlich wurden alle inkorrekten Beziehungen in den Erklärungen von Studierenden gefunden.

4.4.4 Post-hoc-Analyse: Lage der fehlerhaften Beziehungen in Propositionen

Unabhängig von der konkreten Art der Fehler in den Aussagen kann die Lage der fehlerhaften Beziehungen den Bereichen ‘innerhalb des Phänomens’ (im Folgenden mit *phph* bezeichnet), ‘zwischen Phänomen und Theorie’ (*pth*) oder ‘innerhalb der Theorie’ (*thth*) zugeordnet werden. Während der inhaltlichen Analyse der fehlerhaften Beziehungen fiel eine ungleiche Verteilung dieser Beziehungen zwischen den Bereichen auf, weshalb Post-hoc diese Lage genauer untersucht werden soll. Zum Bereich ‘innerhalb des Phänomens’ gehört eine Beziehung dann, wenn alle benachbarten Elemente solche des Phänomens sind. Das gleiche gilt analog für Beziehungen ‘innerhalb der Theorie’. Fehlerhafte Beziehungen liegen zwischen diesen Bereichen, wenn unter ihren benachbarten Elementen jeweils mindestens ein Element des Phänomens und der Theorie ist. Als benachbart sollen solche Elemente angesehen werden, zu denen eine Verbindung nur über Beziehungen oder Metabeziehungen besteht, ohne dabei also über ein anderes Element zu laufen. Da in den Expertenmaps keine inkorrekten Beziehungen auftreten, werden für die Einschätzung der Lage nur die Maps der Studierenden betrachtet.

Um jeder kCM einen vergleichbaren Wert zuordnen zu können, muss die Häufigkeit der Fehler pro Map in den drei Bereichen mit der gesamten Anzahl der Beziehungen innerhalb dieses Bereichs ins Verhältnis gesetzt werden. Eine Normierung soll deshalb erfolgen, weil bei einer großen Map mit vielen Beziehungen in den einzelnen Bereichen eine fehlerhafte Beziehung weniger schwer wiegt als bei einer vergleichsweise kleinen Map mit nur wenig Beziehungen. Es zeigt sich jedoch ein Problem bei dieser Verhältnisbildung. Zur Normierung der fehlerhaften Beziehungen kann die Anzahl der insgesamt vorhandenen Beziehungen in dem jeweiligen Bereich vor der Bereinigung der Maps gewählt werden oder die Zahl der korrekten Beziehungen in dem Bereich, nachdem alle inkorrekten Beziehungen oder

Beziehungen zu nicht relevanten Elementen eliminiert werden. Die fehlerhaften Beziehungen sind nur in den ursprünglichen Maps sichtbar, da in den bereinigten kCMs die fehlerhaften Beziehungen sowie Beziehungen zu nicht relevanten Elementen eliminiert wurden und somit nicht mehr sichtbar sind. In den ursprünglichen Maps ist die Charakterisierung der Anzahl der Beziehungen in den drei Bereichen jedoch nicht wirklich aussagekräftig, denn es kann dort Beziehungen geben, die sich nur irrtümlich in einem Bereich befinden, weil sie beispielsweise über eine fehlerhafte Beziehung oder ein nicht relevantes Element in dem Bereich gebunden sind. Das nachfolgende Beispiel verdeutlicht sowohl das Vorgehen als auch den Irrtum in diesem Vorgehen.

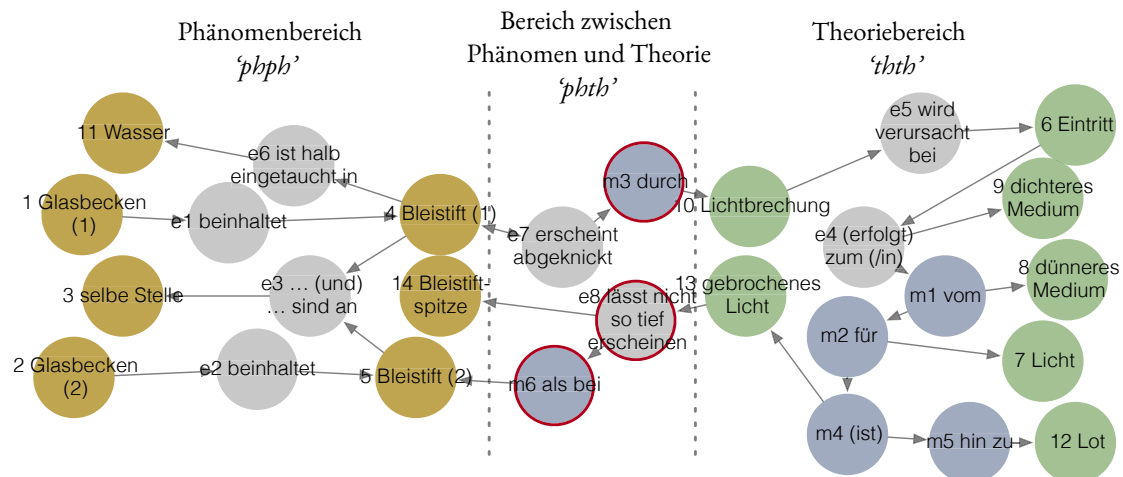


Abbildung 4.1: Beispiel für die Lage von drei fehlerhaften Beziehungen zwischen Phänomen- und Theoriebereich in der Map co4-C

In der Abbildung 4.1 ist die kCM zur Erklärung co4-C dargestellt. In der Map sind drei inkorrekte Aussagen durch Markierung der fehlerhaften Beziehungen e8, m3 und m6 mit jeweils einem roten Ring gekennzeichnet („Bleistift ↔ erscheint abgeknickt“ → durch → Lichtbrechung“, „gebrochenes Licht → lässt nicht so tief erscheinen → Bleistiftspitze“ → als bei → Lichtbrechung“, *inkorrekte Beziehungen unterstrichen*).

Zur Kennzeichnung der Lage der fehlerhaften Beziehungen erhält diese Map drei Werte: die relative Zahl der Fehler im Bereich ‘Phänomen’ (hier: null Fehler in insgesamt vier Beziehungen, also $0/4 = 0$), die relative Zahl der Fehler zwischen den Bereichen ‘Phänomen’ und ‘Theorie’ (hier: drei Fehler in insgesamt vier Beziehungen, also $3/4 = 0.75$) sowie die relative Zahl der Fehler im Bereich ‘Theorie’ (hier: null Fehler in insgesamt sechs Beziehungen, also $0/6 = 0$). Die korrekte Beziehung e7 ist jedoch über eine dieser fehlerhaften Beziehungen, nämlich m3, in den Bereich zwischen Phänomen und Theorie eingebunden. Ohne diese Bindung wäre e7 nur eine Attribuierung des Phänomen-Elements 4 („Bleistift“) und somit in einem anderen Bereich, nämlich innerhalb des Phänomens. Das heißt, dass sich diese Beziehung e7 nur irrtümlich dort befindet. Daraus folgt, dass sich eigentlich zwischen den Berei-

chen Phänomen und Theorie in diesem Beispiel gar keine korrekten Beziehungen befinden und somit die Zahl 0.75 deshalb auch keinen geeigneten Wert für die Kennzeichnung darstellt. Eine alternative Vorgehensweise besteht darin, die Anzahl der Fehler in einem Bereich nicht mit der Anzahl aller Beziehungen in diesem Bereich in der ursprünglichen Map zu normieren, sondern mit der Anzahl der zulässigen Beziehungen in diesem Bereich in den bereinigten Maps, da hier nur noch zulässige Beziehungen auftauchen. Bei diesem Vorgehen ergibt sich jedoch eine andere unvoreilhaftige Situation, welche ebenfalls an dem Beispiel von co4-C verdeutlicht werden kann.

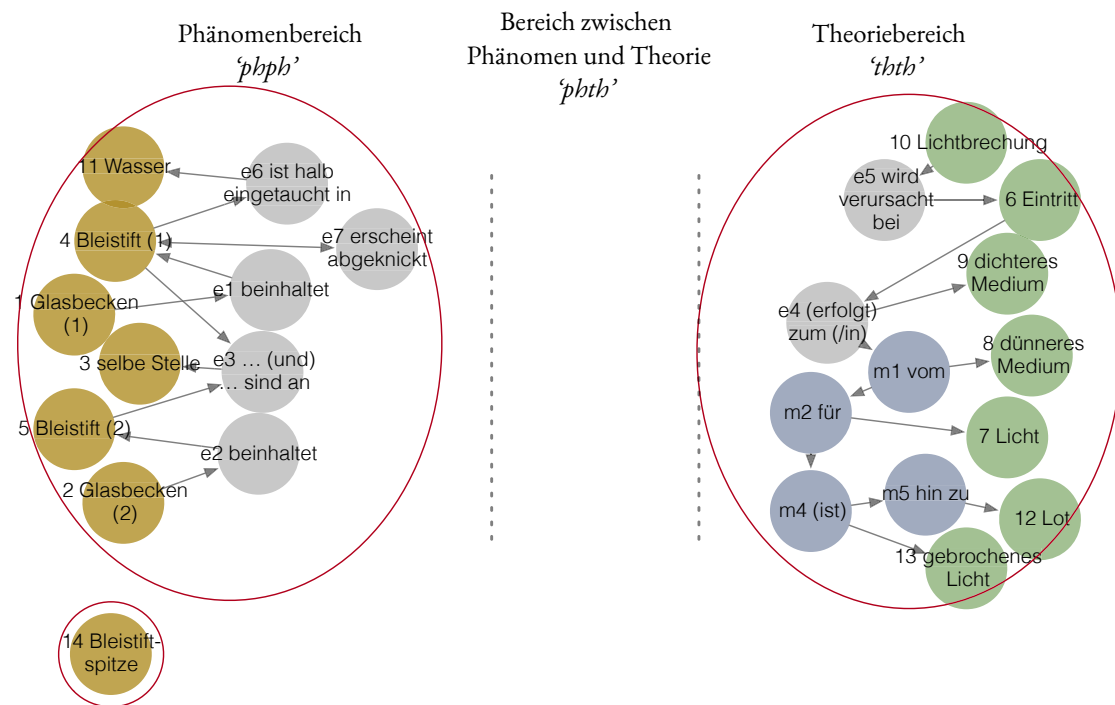


Abbildung 4.2: Beispiel ohne korrekte Beziehungen zwischen Phänomen- und Theoriebereich in der bereinigten Map co4-C; einzelne Fragmente sind umrandet.

Die kCM in der Abbildung 4.2 zeigt die bereinigte Map von co4-C. Dort wurden alle fehlerhaften Beziehungen eliminiert. Die Map verändert ihre Form dadurch stark. Dabei entstehen zwei Probleme. Zum einen gibt es im Bereich zwischen 'Phänomen' und 'Theorie' keine vermittelnden Beziehungen mehr. Das heißt, die Zahl der korrekten Beziehungen dort ist nach der fachlichen Bewertung null. Als Wert für eine Normierung ist null jedoch ungeeignet, weil dann eine Division durch null auftritt. Und zum anderen kann es durch eine Normierung mit der Zahl der korrekten Beziehungen in den Bereichen der bereinigten Maps dazu kommen, dass der Wert größer als eins wird, nämlich dann, wenn es mehr fehlerhafte Beziehungen in einem Bereich der ursprünglichen Map gibt als korrekte Beziehungen dort nach dem Bereinigen. Das erste Problem könnte dadurch gelöst werden, dass der relativen Häufigkeit der fehlerhaften Beziehungen in dem Bereich manuell ein Wert 'eins' zugewiesen wird (1

= ‘alles falsch’), was aber durch das zweite Problem verhindert wird, da ‘eins’ eben nicht zwangsläufig der größtmögliche Wert ist. Durch die Normierung der zuerst genannten Art wird also ein inhaltlicher Fehler begangen, durch die Normierung der zweiten Art ein methodischer Fehler.

Im Vorgriff auf die Ergebnisse sei hier jedoch erwähnt, dass beide Verfahren in Größe und Richtung des Effekts zu gleichen Ergebnissen führen. Aus Gründen der Lesbarkeit sollen die nachfolgenden Analysen sich auf die erste Variante beziehen, in der die relative Häufigkeit der Fehler als Verhältnis der Anzahl der fehlerhaften Beziehungen in einem Bereich zu den insgesamt aufgestellten Beziehungen in diesem Bereich vor dem Bereinigen dargestellt wird.

Die Verteilung der relativen Häufigkeit der fehlerhaften Beziehungen kann mit dem erhobenen Datenmaterial unterschiedlich charakterisiert werden. Zum einen ist zu prüfen, ob in den drei genannten Bereichen der Maps unterschiedlich viele Fehler gemacht werden, und zwar sowohl für alle Studierendenklärungen als auch getrennt für die einzelnen zu erklärenden Phänomene. Zum anderen lässt sich analysieren, ob innerhalb eines Bereichs Unterschiede bei der Erklärung verschiedener Phänomene in der Zahl der relativen Fehlerhäufigkeit feststellbar sind. Diese Analysen sollen durch zwei explorative Post-hoc-Fragestellungen erfasst werden.

Post-hoc FF 1: Wie unterscheiden sich die relativen Häufigkeiten der fehlerhaften Beziehungen *innerhalb* der Bereiche ‘*phpb*’, ‘*thth*’ sowie ‘*phth*’ in den kategorienorientierten Concept Maps zu den Erklärungen verschiedener Phänomene (A - Brechung eines Laserstrahls, B - Hebung einer Münze, C - Knickung eines Bleistifts) in der gesamten Stichprobe der Maps der Studierenden?

Post-hoc FF 2: Wie unterscheiden sich die relativen Häufigkeiten der fehlerhaften Beziehungen *zwischen* den Bereichen *phpb*, *phth* und *thth*

- a) in der gesamten Stichprobe der Maps zu den Erklärungen der Studierenden?
- b) in den Maps zu den Erklärungen zu jeweils einem der gezeigten Phänomene A, B und C?

Eine etwas verkürzte Formulierung zum besseren Verständnis der Fragestellungen lautet für *Post-hoc FF 1*: Machen die Studierenden mehr Fehler z.B. im Bereich ‘Phänomen’, wenn sie statt der Brechung die Hebung erklären sollen? Und für *Post-hoc FF 2*: Machen die Studierenden mehr Fehler z.B. bei der Verknüpfung von Phänomen und Theorie als nur innerhalb der Theorie a) insgesamt, b) aufgelöst nach den jeweiligen Phänomenen? Alle Berechnungen im Rahmen der Post-Hoc-Untersuchungen wurden mit der Software R (R Core Team, 2017) durchgeführt.

Ergebnisse. Für die gesamte Stichprobe werden in der Abbildung 4.3 die Boxplots mit beiden Varianten der Fehlerhäufigkeiten gezeigt. In der Abbildung 4.4 werden die Boxplots getrennt nach den erklärten Phänomenen für die Variante gezeigt, in der die relative Fehlerhäufigkeit auf den Bereich zwischen null und eins normiert ist. In den Boxplots entsprechen die Mediane den waagerechten Teilungen der Kästchen. Die unteren und oberen Enden der Kästchen entsprechen den unteren und oberen Quartilen. Die Whisker (Antennen) liegen jeweils bei 1.5·IQR (Interquartilsabstand). Untere Whisker

existieren in der Abbildung 4.3 aufgrund der Datenverteilung nicht. Alle Werte außerhalb der Whisker sind durch Punkte als Ausreißer gekennzeichnet.

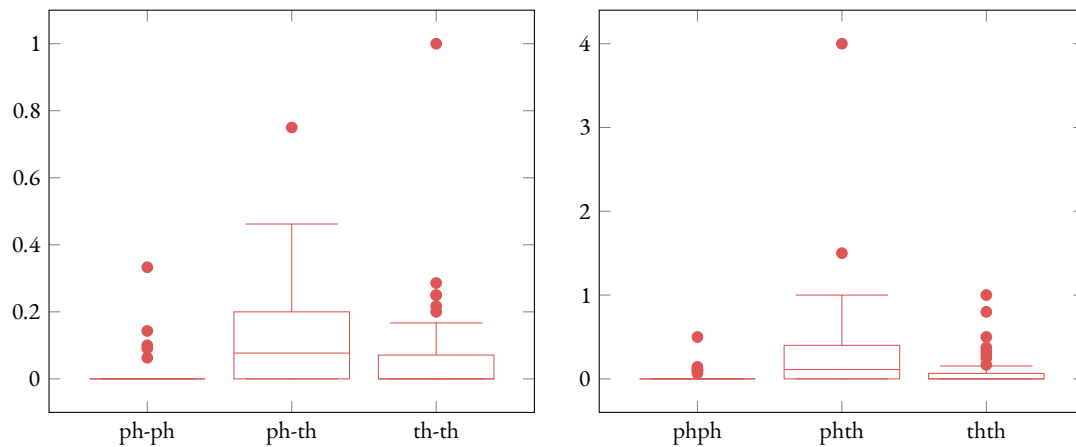


Abbildung 4.3: Boxplots für die relative Anzahl der fehlerhaften Beziehung aller Maps von Studierenden für die Bereiche 'phph', 'phth' und 'thth'; links: als Verhältnis zu den in den ursprünglichen Maps insgesamt aufgestellten Beziehungen in dem jeweiligen Bereich, rechts: als Verhältnis zu den in den bereinigten Maps zulässigen Beziehungen in dem jeweiligen Bereich

Ergebnisse zu Post-hoc FFI. Für die Analyse der Daten wurde der Kruskal-Wallis-Rangsummen-Test (Field, Miles & Field, 2012) verwendet. Dieser nicht parametrische Test prüft für nicht normalverteilte, ordinalskalierte Daten, ob sich in verschiedenen Stichproben die Tendenzen in den Messwerten bzw. die Mediane auf Basis der Rangsummen voneinander unterscheiden. Die Stichproben sind in diesem Fall die auf der Basis der von Probanden gegebenen Erklärungen erstellten Maps zu den Phänomenen A, B und C. Da jeweils die relativen Häufigkeiten für die Bereiche *phph*, *phth* und *thth* zu prüfen sind, müssen drei Kruskal-Wallis-Tests durchgeführt werden. Die Daten können als nicht normalverteilt betrachtet werden, da die Verteilungen in den Bereichen der insgesamt 56 Maps klar erkennbar rechtsschief sind (siehe Abb. 4.5), sodass davon ausgegangen werden kann, dass dies auch für die einzelnen Bedingungen A, B und C gilt.

Eine weitere Annahme für die Gültigkeit des Tests besteht darin, dass die abhängige Variable, also die relative Häufigkeit in der jeweiligen Bedingung, mindestens ordinal skaliert ist. Diese Annahme ist hier durch die Natur des oben beschriebenen Quotienten der relativen Häufigkeit erfüllt. Eine weitere Voraussetzung für die Anwendung statistischer Verfahren ist die Unabhängigkeit der Beobachtungen. Davon kann hier nicht ohne weiteres ausgegangen werden, da ein Proband jeweils immer unter zwei der drei Bedingungen getestet wurde. Jeder Proband hat zwei Phänomene erklärt.

Zur Prüfung einer möglichen Abhängigkeit kann die relative Häufigkeit auf eine Korrelation zwischen jeweils zwei der drei Beobachtungen für die entsprechenden Probanden untersucht werden. Das bedeutet: Wie korreliert z.B. die relative Fehlerhäufigkeit in der Map eines Probanden zum Phänomen

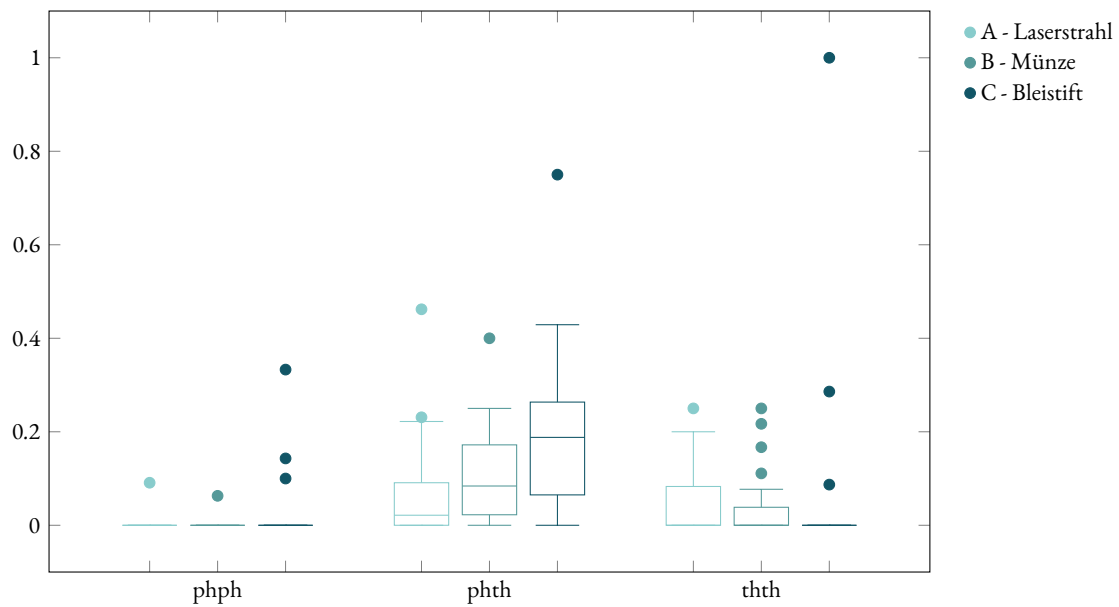


Abbildung 4.4: Boxplots für die relative Anzahl der fehlerhaften Beziehung in Maps von Studierenden für die Bereiche 'phph', 'phth' und 'thth' getrennt nach den Phänomenen

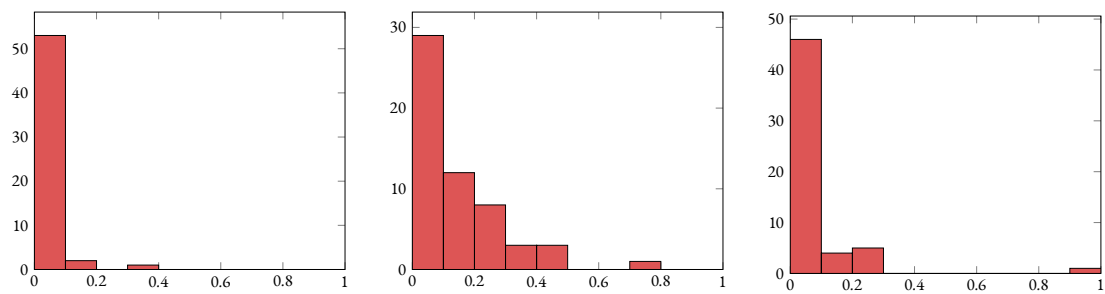


Abbildung 4.5: Histogramme der relativen Fehlerhäufigkeiten aller Maps für die Bereiche *phph* (links), *phth* (Mitte) und *thth* (rechts)

A mit der Fehlerhäufigkeit zum Phänomen B? Die Korrelation soll hier exemplarisch für den Bereich '*phth*' geprüft werden, da in den anderen beiden Bereichen fast alle Werte null sind und somit beispielsweise in dem Bereich '*phph*' für die Prüfung der Korrelation zwischen den Fehlerhäufigkeiten der Maps etwa zu den Phänomenen A und B nur zwei verschiedene Werte zur Verfügung stehen.

In dem vorliegenden Fall sollen aufgrund der nicht normalverteilten Datenlage und des kleinen Stichprobenumfangs Kendall's τ (Döring & Bortz, 2016) sowie die Irrtumswahrscheinlichkeit als Kennwert für die Korrelation zweier Paare von Maps zu den Phänomenen A, B und C angegeben werden. Für die Berechnung dieses Wertes wurden jeweils nur die relativen Fehlerhäufigkeiten in den Maps zu den Erklärungen aller Probanden benutzt, die die Phänomene A und B (τ_{A-B}) erklärt haben, respektive A und C (τ_{A-C}) sowie B und C (τ_{B-C}).

Tabelle 4.8: Werte für Kendalls τ zur Prüfung der Korrelation in dem Bereich '*phth*'

Zusammenhang	Kendalls τ	p
A-B	-0.09	.836
A-C	-0.12	.748
B-C	-0.39	.175

Die Werte in der Tabelle 4.8 deuten darauf hin, dass es in der vorliegenden Stichprobe nur eine mittlere negative Korrelation zwischen den Fehlerhäufigkeiten in den Maps zu den beiden Hebungsphänomenen B und C gibt sowie eine schwach negative Korrelation zwischen A und C. Jedoch ist keiner der Zusammenhänge signifikant. Daher kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass die Voraussetzungen für die Anwendung des Kruskal-Wallis-Rangsummen-Tests erfüllt sind.

Tabelle 4.9: Ergebnisse der Kruskal-Wallis-Rangsummen-Tests

abh. Variable	Teststatistik H	p
<i>phph</i>	2.22	.33
<i>phth</i>	10.25	.006
<i>thth</i>	1.83	.4

Die relativen Fehlerhäufigkeiten in den Bereichen '*phph*' und '*thth*' unterscheiden sich jeweils nicht signifikant zwischen den Maps zu den Erklärungen der verschiedenen Phänomene A, B und C. Einen signifikanten Unterschied gibt es lediglich in der Variablen '*phth*' ($H_{phth} = 10.25$; $p_{phth} = 0.006$). Durch einen Post-hoc-Paarvergleich in diesem Bereich zwischen den Erklärungen kann geprüft werden, zwischen welchen Phänomenen ein signifikanter Unterschied sichtbar wird. Eine kritische Differenz von 12.84 ($\alpha = .05$) wird dabei nur für den Unterschied zwischen den Maps zu den Erklärungen von A und C überschritten (beobachtete Differenz = 17.02), wobei ein mittlerer Effekt vorliegt ($r = -.41$)². In der

²Zur Berechnung von Effektstärken bei nicht parametrischen Tests siehe z.B. Field et al. (2012, S. 665, 685)

Tabelle 4.10 sind die Mediane der relativen Fehlerhäufigkeiten in den einzelnen Bereichen sowohl getrennt für die einzelnen Phänomene als auch für die gesamte Stichprobe aufgelistet. In der Abbildung 4.4 sind damit von den drei mittleren Boxplots (*phth*) der linke (Laserstrahl, ganz hell) und der rechte (Bleistift, ganz dunkel) signifikant voneinander unterschieden.

Tabelle 4.10: Mediane der relativen Fehlerhäufigkeiten

	<i>phph</i>	<i>phth</i>	<i>thth</i>
Laserstrahl	0	.043	0
Münze	0	.091	0
Bleistift	0	.194	0
insgesamt	0	.084	0

Ergebnisse zu Post-hoc FF 2: Zur Einschätzung des Unterschieds in den relativen Häufigkeiten der fehlerhaften Beziehungen zwischen den Bereichen '*phph*', '*phth*' und '*thth*' wird der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für gepaarte Stichproben mit nicht normalverteilten Daten angewendet (Field et al., 2012, S. 667). Es werden also immer Paarungen verglichen, die jedoch von dem selben Probanden stammen müssen. Diese Voraussetzung der Paarungen liegt hier vor, weil in einer Map, in der z.B. Beziehungen in dem Bereich '*phph*' aufgestellt werden, auch Beziehungen in einem jeweils anderen Bereich vorhanden sind und somit drei einzelne Paarungen betrachtet werden. Für die Unabhängigkeit der Stichprobe gelten die obigen Ausführungen. In der Tabelle 4.11 sind die Teststatistiken (*V*), die Irrtumswahrscheinlichkeiten (*p*) und bei signifikanten Unterschieden die Effektgröße (*r*) angegeben. Aufgrund der Tatsache, dass jeweils eine Variable (z.B. '*phph*') Post-hoc auf zwei Hypothesen (Unterschied zu '*phth*' und '*thth*') getestet wird (also insgesamt drei Hypothesen), muss eine alpha-Fehler-Kumulierung durch eine entsprechende Korrektur des Signifikanzniveaus verhindert werden (Field et al., 2012, S. 428). In der Tabelle sind die mit Berücksichtigung der Korrektur des Signifikanzniveaus nach Holm (Field et al., 2012, S. 430) signifikanten Ergebnisse durch Angabe der Effektstärke gekennzeichnet. Bei dieser Korrektur werden die Irrtumswahrscheinlichkeiten innerhalb jedes Phänomens jeweils der Größe nach aufsteigend sortiert (*i* = 1, 2, 3) und das ursprüngliche Signifikanzniveau $\alpha = .05$ durch diese Zahl dividiert, sodass sich für den jeweils größten Wert ein korrigiertes Signifikanzniveau von $\alpha_1 = .05/1 = .05$ ergibt, für den zweitgrößten Wert $\alpha_2 = .02/1 = .025$ und für den kleinsten Wert $\alpha_3 = .05/3 = .017$. Die Effektstärke wird nach Döring und Bortz (2016) eingeordnet.

In der gesamten Stichprobe gibt es zwischen allen Bereichen signifikante Unterschiede mit mittleren Effektstärken zwischen '*thth*' und '*phth*' ($r = -.40$, siehe Tab. 4.11) und zwischen '*thth*' und '*phph*' ($r = -.31$) sowie einem großen Effekt beim Unterschied zwischen '*phth*' und '*phph*' ($r = -.72$). In der Abbildung 4.3 (links) sind damit alle Boxplots voneinander verschieden. In den Maps zu den Erklärungen des geknickten Laserstrahls (A) treten signifikante Unterschiede und große Effekte zwischen den Bereichen '*thth*' und '*phph*' ($r = -.58$) sowie '*phth*' und '*phph*' ($r = -.55$) auf. In der Abbildung 4.4

sind dementsprechend die hellgrünen Plots ganz links und in der Mitte signifikant voneinander verschieden, sowie ganz links und ganz rechts. Bei B zeigen sich ebenfalls große Effekte zwischen *'phth'* und *'phph'* ($r = -.75$) (Abb. 4.4, jeweils mittel-helle Plots, Unterschied zwischen linkem und mittlerem Plot) und bei C zwischen *'phth'* und *'phph'* ($r = -.83$) sowie zwischen *'thth'* und *'phth'* ($r = -.55$). Für die (hier nicht dargestellte) Variante, in der die relative Fehlerhäufigkeit nicht normiert ist, ergeben sich in der Tendenz ähnliche Werte: Alle in der Tabelle 4.11 signifikanten Unterschiede bleiben signifikant mit vergleichbaren oder größeren Effekten.

Tabelle 4.11: Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests

Phänomen	Bereiche	V	p	r
Gesamt	<i>thth - phph</i>	168	.020	-.31
	<i>phth - phph</i>	958	< .001	-.72
	<i>thth - phth</i>	312	.003	-.40
A	<i>thth - phph</i>	36	.014	-.58
	<i>phth - phph</i>	60	.020	-.55
	<i>thth - phth</i>	59	.642	n.s.
B	<i>thth - phph</i>	20	.060	n.s.
	<i>phth - phph</i>	132	.001	-.75
	<i>thth - phth</i>	32	.063	n.s.
C	<i>thth - phph</i>	11	1.000	n.s.
	<i>phth - phph</i>	151	< .001	-.83
	<i>thth - phth</i>	27	.020	-.55

Für die gesamte Stichprobe, also auf alle drei optischen Phänomene bezogen, zeigen die Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests, dass im Vergleich zwischen den Beziehungen diejenigen am meisten Schwierigkeiten bereiten, die zwischen dem Phänomen und der Theorie liegen. Dieser Tendenz wird jedoch beim Laserstrahl nicht gefolgt. Dort sind die Unterschiede nur in den Fehlerhäufigkeiten der Beziehungen zwischen *'thth'* und *'phph'* sowie zwischen *'phth'* und *'phph'* signifikant.

4.4.5 Besondere Ausprägungen formaler Merkmale der Maps (FF 3)

Ein formales Merkmal von kCMs ist die Anzahl der unverbundenen Fragmente, die eine Map umfasst. Solche Zerklüftungen können bereits in den ursprünglichen Maps, also vor der fachlichen Bewertung, auftreten, und durch die fachliche Bewertung sowie durch das Eliminieren nicht relevanter Elemente verstärkt werden. Diese zweite Art der Fragmentierung wird in den bereinigten Maps sichtbar, wobei es zur Abtrennung einzelner Elemente oder Propositionen von einem größeren Hauptfragment kommen kann, aber auch zum Zerfall in verschiedene Fragmente, die mehr als nur eine Proposition enthalten. Fragmente, die mindestens eine Proposition enthalten, können sowohl innerhalb des Phänomen- oder des Theoriebereichs oder in beiden Bereichen zugleich liegen.

Fragmentierungen in den ursprünglichen kCMs. In einigen der kategorienorientierten Concept Maps sind bereits vor der Eliminierung fehlerhafter Beziehungen und nicht relevanter Elemente Zerflüchtigungen in mehrere Fragmente erkennbar (a01-A, a01-B, b01-A, b01-C, c02-B, d01-A, e01-C, f02-C). Dabei handelt es sich ausschließlich um Fragmentierungen in zwei Teile (denkbar wären auch mehr). In einigen dieser Maps sind lediglich einzelne Propositionen von einem Hauptfragment isoliert (b01-C, d01-A), in den anderen sind größere Einzelfragmente mit jeweils mehr als einer Aussage voneinander getrennt.

Die Map a01-A enthält im oberen Fragment eine phänomenspezifische Beschreibung der Brechung an der Grenzfläche („Übergang 1“) im Strahlenkonzept mit einer sprachlichen, jedoch inkorrekten Darstellung des Snelliusschen Brechungsgesetzes sowie zusätzlich eine Beschreibung des Verhaltens von Licht im modernen Teilchenkonzept („Photonen“) an der vorderen Grenzfläche auf dem Weg zum Beobachter. Das Fragment beinhaltet darüber hinaus eine qualitative Unterscheidung der Richtung der Brechung (in „Richtung“ vom bzw. „weg vom“ „Lot“). Das untere Fragment ist eine allgemeine Beschreibung von „charakteristischen Brechungsphänomenen“ an der Grenzfläche zwischen zwei Stoffen („Stoff 1“, „Stoff 2“) als Beispiel für die „Wellennatur“ von Licht.

In der kCM a01-B kann im oberen Fragment ebenfalls eine Beschreibung „charakteristischer Brechungsphänomene“ als Beispiel für die „Wellennatur“ des Lichts sowie eine Beschreibung der Richtung der Brechung (in „Richtung“ vom bzw. „weg vom“ „Lot“) in verschiedenen Konstellationen der beteiligten Medien erkannt werden. Es wird das gezeigte Phänomen beschrieben, wobei die Münze „weiter hinten“ beobachtet wird als sie „tatsächlich“ liegt. Diese Beobachtung wird auf den Begriff der „Brechung“ zurückgeführt. Das untere Fragment enthält eine Beschreibung der Brechung im Strahlenkonzept mit einer (fachlich inkorrekten) sprachlichen Darstellung des Snelliusschen Brechungsgesetzes.

Die Map b01-A benennt im oberen, kleineren Fragment die Lichtbrechung als „typisches Phänomen“ der Physik. Im unteren Fragment wird die Brechung im Strahlenkonzept mit einer Darlegung des Snelliusschen Brechungsgesetzes und einer Nennung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht als charakteristische Eigenschaft der beteiligten Medien in Zusammenhang gebracht.

Das obere, größere Fragment in b01-C beinhaltet eine Beschreibung des Eindrucks vom Stift für das „menschliche Auge“ und einer „Erklärung“ des Eindrucks durch die „Brechungsgesetze“. Die Aussage, dass sich hier „klassische Brechungsphänomene“ zeigen, bildet das untere, kleinere Fragment in dieser Map.

Die kCM c02-B besteht aus zwei größeren Teilen, wobei der obere eine Beschreibung der scheinbar unterschiedlichen Lage der Münzen in den beiden Behältern („Behälter (1)“, „Behälter (2)“) beinhaltet sowie einen Vergleich der Lichtwege mit bzw. ohne Brechung sowie eine Nennung des Fermatschen Prinzips. Dahingegen umfasst das untere Fragment einige Konstituenten des Snelliusschen Brechungsgesetzes, sowie die Aussage, dass sich (ohne Beleg) das Phänomen mithilfe dieses Gesetzes „quantitativ analysieren“ ließe.

Die Map d01-A enthält ein Hauptfragment, in dem ein Zusammenhang zwischen dem Verlauf

des Laserstrahls und den Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Licht in Medien mit verschiedenen Brechungsindizes bzw. zum Fermatschen Prinzip genannt wird. Der zweite Teil liegt in Form einer Aussage vor, dass ein antiproportionaler Zusammenhang bestünde.

In der Map e01-C zur Erklärung des scheinbar geknickten Bleistifts kann im oberen Fragment eine Beschreibung des Verlaufs von Lichtstrahlen von einem „Punkt“ des Bleistifts unter Berücksichtigung der Brechung und der vom Betrachter erwarteten Position dieses Punkts erkannt werden. Das untere Fragment beschreibt die Brechung von Licht als Folgerung aus dem elektromagnetischen Feldkonzept.

Schließlich wird in f02-C die Formulierung, dass „Lichtwellen“ in einem „bestimmten Winkel“ an der Wasseroberfläche gebrochen würden, in dem oberen Fragment dieser Map sichtbar, das untere Fragment enthält eine Beschreibung der Beobachtung des Bleistifts als geknickt und eine Rückführung auf das Konzept der „Lichtbrechung“.

Im Überblick kann festgestellt werden, dass die genannten Maps häufig in beiden Fragmenten Elemente oder Beziehungen enthalten, die jeweils explizit auf die Brechung verweisen, diese Brechung jedoch unterschiedlich konzipiert ist. In a01-A wird im oberen Fragment die Brechung im Strahlenkonzept erläutert, im unteren Fragment im Wellenkonzept, oder im oberen Fragment von e01-C im Strahlenkonzept und im unteren Fragment im Feldkonzept. In einigen Maps taucht das Snelliussche Brechungsgesetz in einem Fragment auf, während das andere Fragment die im Phänomen erkannte Struktur nur auf den Begriff der „Brechung“ zurückführt (a01-B, c02-B). Eine verkürzte Zurückführung auf das Konzept der „Brechung“ oder die Bezeichnung als „Brechungsphänomen“ ohne konkrete Nennung und Anbindung der einzelnen theoretischen Elemente bei der Brechung tritt auch auf, ohne dass in dem jeweils anderen Fragment das Brechungsgesetz explizit dargelegt wird (b01-C, f02-C). In d01-A wird in einem Fragment ein „antiproportionaler Zusammenhang“ genannt, der in dem anderen Fragment tatsächlich ausgeführt wird, wobei die kCM diese Verbindung nicht erfasst und deshalb an dieser Stelle eine Fragmentierung auftritt.

Fragmentierungen in den bereinigten kCMs - Abtrennung von einzelnen Elementen und Propositionen.

In 34 Maps können nach der Eliminierung inkorrektur Beziehungen und nicht relevanter Elemente kleinere Fragmente in Form von einzelnen Elementen oder Propositionen entdeckt werden. Dabei sind insgesamt 62 dieser kleineren Fragmente sichtbar. Diese Fragmente sind in der Tabelle 4.12 aufgelistet. In dieser Tabelle sind die Art und der Inhalt des Fragments benannt. Unterschieden werden die Arten der Fragmente danach, ob es sich um einzelne Elemente oder Aussagen handelt, sowie danach, ob die Fragmente innerhalb des Theorie- oder Phänomenbereichs liegen oder dazwischen (*ü-Aussage* für 'übergreifende Aussage'). 45 Fragmente liegen innerhalb des Theoriebereichs, zwölf innerhalb des Phänomenbereichs und fünf übergreifend in beiden Bereichen. Besonders häufig, nämlich zwölfmal, sind die Brechung oder das Brechungsgesetz selbst als Konzepte bzw. als Beziehung in einer Aussage („wird gebrochen“) in den Fragmenten sichtbar (a01-B, a04-A, b01-C, c01-B, c02-B, c03-C, d03-B, e01-C, e04-C, f02-B, f02-C, j02-C). Ebenfalls häufig (elfmal) sind Teile des Brechungsgesetzes wie z.B. „Grenzfläche“ oder „Einfallswinkel“ in den Fragmenten zu erkennen (a01-A, a01-B, a03-A, b03-C, e01-

A, eo1-C, fo1-B, fo2-B, fo2-C, ho3-A, jo1-B; die „Wasseroberfläche“ wird dabei nicht mitgezählt). In den abgetrennten Fragmenten taucht die „Wasseroberfläche“ bzw. die Grenzfläche oder Phasengrenze siebenmal namentlich auf.

Fragmentierungen in den bereinigten kCMs - Zerfall in größere Fragmente. In der Map bo1-A führt eine nicht haltbare Formulierung (das „Medium“ statt die Mediengrenze bräche das Licht) zum Zerfall der ursprünglich schon fragmentierten Map in zwei weitere, größere Fragmente. Das neu entstehende mittlere Fragment führt die Brechung von Lichtstrahlen auf die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Medien zurück, das untere Fragment enthält explizit das Snelliussche Brechungsgesetz. Alle Fragmente erstrecken sich über die Bereiche Phänomen und Theorie zugleich.

In bo2-C entstehen aus einem vormals kohärenten Netzwerk nach der Bewertung einer Beziehung als Fehlinterpretation der Wahrnehmung zwei Teile, von denen der untere Teil die Aussage enthält, das Phänomen ließe sich durch die Brechung erklären, der obere dann eine Beschreibung des Phänomens beinhaltet sowie die Verbindung zu sich unterschiedlich verhaltenden Lichtstrahlen in den beiden gezeigten Behältern (mit und ohne Wasser).

Die Map co2-B ist bereits ohne Eliminierung in einen größeren Teil und einen kleineren Teil zerklüftet. Dieser kleinere Teil zerfällt nach der fachlichen Bewertung einer Beziehung als nicht haltbare Formulierung in eine bereichsübergreifende Aussage, nach der sich das Phänomen (ohne Beleg) mithilfe des Snelliusschen Brechungsgesetzes „quantitativ analysieren“ ließe sowie in einen theoretischen Teil mit drei Konstituenten des Brechungsgesetzes.

In der Map co4-C werden der Phänomen- und Theoriebereich nach der fachlichen Bewertung vollständig voneinander getrennt. Das Phänomenfragment enthält eine Beschreibung des Eindrucks der beiden gezeigten Bleistifte im Vergleich, das Theoriefragment beschreibt die Brechung von Licht hin zum Lot in unterschiedlich dichten Medien. Zudem wird das ph-Element „Bleistiftspitze“ von diesen beiden größeren Fragmenten abgelöst.

In do2-A führt die Eliminierung nicht relevanter Elemente zur Abtrennung eines Fragments mit zwei th-Propositionen, die das „Brechungsgesetz“ beinhalten, sowie zu zwei weiteren einzelnen Elementen.

Die Map go1-A enthält nach der Eliminierung einen Verstoß gegen fachlich etablierte Prinzipien (hier: Fermatsches Prinzip) zur Abtrennung eines größeren Th-Fragments bestehend aus vier Propositionen, die eben das Fermatsche Prinzip betreffen.

Schwach verbundene Phänomen- und Theoriebereiche. In einigen Maps können unabhängig von einer konkret vorliegenden Fragmentierung schwach miteinander verbundene Phänomen- und Theoriebereiche gefunden werden. Eine schwache Verbindung liegt - ohne Verweis auf quantitative Kriterien - vor, wenn nur ein geringer Teil der Elemente in den jeweiligen Bereichen durch wenige Beziehungen miteinander verbunden ist.

In ao4-A beispielsweise sind zwei von insgesamt neun ph-Elementen mit nur einem von insgesamt

Tabelle 4.12: Übersicht über die abgetrennten Fragmente

Map	Art des Fragments	Benennung der abgetrennten Elemente und Aussagen
ao1-A	2 th-Elemente	$n_1/n_2, \sin(\theta_1)/\sin(\theta_2)$
ao1-B	2 th-Elemente	$n_1/n_2, \sin(\theta_1)/\sin(\theta_2)$
	1 th-Aussage	Strahlen unterliegen Brechung
ao2-A	1 th-Element	Fermat'sches Prinzip
ao3-A	2 th-Elemente	optisch dünnerer Stoff, optisch dichter Stoff
ao3-B	1 ph-Aussage	Münze wirkt an anderer Ort
ao4-A	1 th-Element	Licht
	1 th-Aussage	Grund liegt in Brechung
ao4-B	1 ü-Aussage	Medium ist Luft
bo1-C	1 ü-Aussage	zusammenhängendes Bild ergibt sich in Gehirn
	1 th-Aussage	Brechungsgesetze liefern Erklärung
bo2-C	1 th-Element	direkter Weg
bo3-C	1 th-Element	optische Achse
	1 ph-Element	Wasseroberfläche
co1-B	1 th-Element	Brechungsgesetz
co2-B	1 th-Element	beide Teilstrecken
	2 ü-Aussagen	Auge nimmt wahr nicht leuchtender Gegenstand, Phänomen lässt sich quantitativ analysieren mithilfe von Snellius Brechungsgesetz
co2-C	1 th-Aussage	Licht hat Strahlengang
co3-C	2 th-Elemente	Licht, Lichtbrechung
	1 th-Aussage	Effekt lässt sich beobachten
co4-C	1 ph-Element	Bleistiftspitze
do1-A	1 th-Element	geometrische Optik
do2-A	2 th-Elemente	Wellenbild, Elektrodynamik
do2-B	1 ph-Element	scheinbare Verschiebung
	1 th-Element	geometrisches Problem
	1 th-Aussage	Lichtstrahl ist Modell
do3-B	1 th-Aussage	Brechungsgesetz hat Nutzung
do4-B	1 ph-Element	Fall
	1 th-Element	Gegenteil
eo1-A	1 th-Element	Flächennormale
eo1-C	4 th-Elemente	Licht, Brechung, klassische Physik, Grenzfläche
eo2-A	1 ph-Element	Wirklichkeit
eo2-C	1 th-Element	Licht
eo4-C	1 ph-Element	Betrachter
	1 ü-Aussage	Licht wird gebrochen an Wasseroberfläche
fo1-B	1 ph-Element	Wasseroberfläche
	2 th-Elemente	Brechungsindex, zurückgelegter Weg
fo2-B	2 th-Elemente	Lichtbrechung, bestimmter Winkel
	1 ph-Element	Wasseroberfläche
fo2-C	2 th-Elemente	Lichtbrechung, bestimmter Winkel
	1 ph-Element	Wasseroberfläche
ho3-A	1 th-Element	Einfallswinkel
jo1-B	2 th-Elemente	Lot, Phasengrenze
jo1-C	2 th-Elemente	Resultat, Punkt
jo2-B	1 th-Element	alle Strahlen
jo2-C	1 th-Element	Lichtbrechung
xo3-C	2 ph-Elemente	Abknickverhalten, oben beschriebene Gründe

sechs th-Elementen durch eine Beziehung verbunden: „unterschiedliche Medien → sind hier → Luft (und) Wasser“. Die „Brechung“ befindet sich hier in einem eigenen Fragment, welches z.B. nicht mit dem „Laserstrahl“ verbunden ist. Die Wasseroberfläche oder das Lot fehlen in der Erklärung, weshalb diese Elemente auch nicht mit anderen bzw. miteinander verbunden werden können. Die Map a04-B des gleichen Probanden verbindet zwei (von zehn) ph-Elementen mit zwei (von drei) th-Elementen mit Hilfe von zwei Aussagen und ist dabei fragmentiert: Eine Aussage lautet „Medium → ist → Luft“, die andere besagt, dass die unterschiedliche Sichtbarkeit als „Effekt“ einen „Grund“ hat.

In co3-B sind drei von insgesamt elf ph-Elementen mit drei von vier th-Elementen durch folgende Aussagen miteinander verbunden „Phänomen → hängt zusammen mit → Brechung“, „Phänomen → hängt zusammen mit → Brechungsindex (Luft) und Brechungsindex (Wasser)“, „Luft → hat → Brechungsindex (Luft)“ und „Wasser → hat → Brechungsindex (Wasser)“. Wie das Phänomen mit der Brechung bzw. mit den Brechungsindizes zusammenhängt, wird nicht erläutert. Das Element des Beobachters fehlt, ein Lichtweg wird nicht nachvollzogen. Das gleiche gilt für co3-C. In der Map zur Erklärung des geknickten Bleistifts verbindet der gleiche Proband nur ein ph-Element (von insgesamt acht) mit einem (von vier) th-Elementen: „Wasser → hat → höherer Brechungsindex“. Hier fehlen beispielsweise die Elemente der Grenz- oder Wasseroberfläche sowie die Luft. Der Theoriebereich umfasst insgesamt vier vollständig voneinander isolierte Elemente.

Die Map co4-B verbindet eines von insgesamt acht ph-Elementen mit drei (von sechs) th-Elementen durch drei (Meta-)Beziehungen miteinander, die die Propositionen: „Eintritt → (erfolgt) in → dichteres Medium → von dünneres Medium → für → Glasbecken (2)“. Hier fehlen das Konzept des Bildes der Münze sowie die Luft als beteiligtes Medium, der Betrachter ist nicht in den Lichtweg eingebunden. In co4-C gelingt es dem Probanden gar nicht mehr, den Phänomenbereich und den Theoriebereich miteinander in fachlich richtige Beziehungen zu setzen. Hier sind sieben ph-Elemente sowie sieben th-Elemente vollständig voneinander getrennt. Der Beobachter, das Bildkonzept sowie die Luft fehlen in dieser Erklärung.

In der Map do2-B sind zwei von elf ph-Elementen mit zwei von elf th-Elementen über insgesamt zwei Aussagen miteinander verbunden. Eine der Aussagen lautet: das „Phänomen → lässt sich zurückführen auf → Brechung“, die andere: „Streulicht → fällt auf → Münze (1)“. Der genannte Betrachter wird hier nicht in den Lichtweg eingebunden. Der Lichtweg endet in der Map unmittelbar nach dem Durchgang durch die „Grenzfläche“. Das Bild der Münze wird nicht benannt, ebenso wenig wie die Luft und das Wasser als beteiligte Medien. Diese Map hat darüber hinaus die Besonderheit, dass vor der fachlichen Bewertung 16 Beziehungen zwischen dem Phänomen und der Theorie lagen, nach der Eliminierung inkorrekturer Beziehungen und nicht relevanter Elemente nur noch zwei.

In den Maps fo2-B und fo2-C sind die Phänomen- und Theoriebereiche vollständig voneinander getrennt. Die Theoriebereiche enthalten jeweils nur noch die (unverbundenen) Elemente „Lichtbrechung“ und „bestimmter Winkel“. Hier fehlt jeweils ein Beobachter sowie das 'Bild'. Die Wasseroberfläche ist weder an die übrige Phänomenbeschreibung angekoppelt noch in den Lichtweg eingebunden bzw.: ein Lichtweg existiert nicht.

Weitere Auffälligkeiten. Die Experten-Map x02-A zur Erklärung des gebrochenen Laserstrahls enthält nur theoretische Elemente, auf die sichtbare Struktur des Phänomens wird nicht eingegangen. Die Map x02-C des gleichen Experten enthält 14 Elemente des Phänomens sowie 21 der Theorie, die über 31 Beziehungen zwischen diesen Bereichen miteinander verbunden sind. Im Gegensatz dazu enthält die Expertenmap x03-C (Bleistift) nur Elemente des Phänomens. Wiederum sind jedoch in den anderen Maps des gleichen Experten (x03-A und x03-B) sowohl Elemente des Phänomens als auch der Theorie zu finden, in x03-B 26 ph-Elemente und 12 th-Elemente, die über 45 Beziehungen zwischen den Bereichen Phänomen und Theorie verknüpft sind. In der Map x01-B können 58 Beziehungen zwischen den beiden Bereichen mit 14 ph-Elementen und 25 th-Elementen gefunden werden.

Die Map bor-C ist besonders stark zerklüftet: Dort sind vier Fragmente bei insgesamt nur acht Elementen sichtbar, die folgende Aussagen bzw. Elemente enthalten: „Brechungsphänomene \leftrightarrow zeigen sich hier“, „zusammenhängendes Bild \rightarrow ergibt sich in \rightarrow Gehirn“, „Brechungsgesetze \rightarrow liefern \rightarrow Erklärung“, sowie der Eindruck des Stiftes für das „menschliche Auge“ und die unterschiedlich in das Auge einfallenden Lichtstrahlen“. Ebenfalls nur acht Elemente enthält die Map fo2-C und sogar nur sieben die Map gor-B.

4.5 DISKUSSION

4.5.1 Diskussion der Kennwerte für die Beurteilerübereinstimmung

Das gesamte Verfahren zum Erstellen kategorienorientierter Concept Maps weist in der Hauptstudie etwas schlechtere Werte auf als in der Vorstudie. Die Beurteilerübereinstimmung für die Kategorisierung der Elemente in der Vorstudie liegt dabei noch im Vertrauensbereich von κ in der Hauptstudie. Auf die fachliche Bewertung trifft dies nicht mehr zu. Die Übereinstimmungen sind in beiden Fällen zunächst deutlich überzufällig. Bei der Einschätzung der fachlichen Bewertung muss wieder berücksichtigt werden, dass bei nur zwei Kategorien und besonders häufiger Übereinstimmung in einer Kategorie das Maß ‘Cohens κ ’ anfällig gegenüber einer bereits kleinen Zahl von Abweichungen ist. Trotzdem ist die Entscheidung, nur zwei Kategorien (falsch, richtig) zuzulassen, zumindest infrage zu stellen und Alternativen sind zu prüfen. Gleichwohl impliziert die Hinzunahme einer dritten Kategorie für eine Bewertung von Aussagen als Grenzfall *zwischen* ‘falsch’ und ‘richtig’ nicht, dass sich dadurch die Werte für die Beurteilerübereinstimmung zwangsläufig verbessern.

4.5.2 Nicht relevante und fehlende zentrale Elemente (FF1)

Der Begriff der optischen Täuschung ist unter den nicht relevanten Elementen vergleichsweise häufig zu finden. Er wird dabei zwar im wörtlichen Sinne nicht falsch verwendet, weil zumindest bei den Phänomenen der Knickung und Hebung der für die optischen Erscheinungen zuständige Sehsinn tatsächlich getäuscht wird, nämlich im Verhältnis zum Tastsinn, aber üblicherweise werden als optische Täuschung solche Eindrücke bezeichnet, bei denen die Veränderung der Bildwahrnehmung nicht auf-

grund physikalischer Vorgänge geschieht, sondern aufgrund psychologischer Prozesse. So tauchen in gängigen Lehrbüchern der Physik die Begriffe der optischen Täuschung oder Illusion gar nicht auf (Meschede et al., 2015; Niedrig, 2004; Tipler & Mosca, 2012) oder sie werden kohärent mit der in dieser Arbeit vorgenommenen Betrachtungsweise als psychologische Artefakte bezeichnet, wie beispielsweise die scheinbare Größe des aufgehenden Mondes in Demtröder (2009). Einzig im Inhaltsverzeichnis bei Giancoli (2010) wird die „optische Illusion“ mit Verweis auf das Phänomen der Fata Morgana genannt; in dem erklärenden Text zu diesem Verweis taucht der Begriff selbst jedoch auch nicht mehr auf.

Die Verwendung von Elementen der jeweils anderen gezeigten Phänomene oder der Verweis auf verwandte Konstellationen zeigt, dass der vor der Untersuchung gegebenen Bitte, die Phänomene unabhängig voneinander zu erklären, also ohne Bezug aufeinander zu nehmen, verschiedentlich nicht Folge geleistet wurde. Selbst einer der Experten (x03) kam diesem Wunsch nicht nach, weswegen auch seine Erklärung zum geknickten Bleistift Elemente des Phänomens B, also der Münze, beinhaltet. Die Verwendung von Lichtstrahlen in dieser Erklärung unterbleibt ebenfalls mit dem Verweis auf das ähnliche Verhalten der beiden Hebungsphänomene.

Teilweise wird in den Erklärungen versucht, einzelne Elemente benachbarter Konzeptionen in die Erklärung der Hebungsphänomene einzubauen (a01-A, d01-B) oder es werden einige nicht relevante, physikalische Eigenschaften in Zusammenhang mit dem gezeigten Phänomen gebracht (a04-A, a03-B, d04-A). Dieses Verhalten kann als Unsicherheit in der Auswahl vor allem der relevanten theoretischen Elemente betrachtet werden, wie die vergleichsweise häufige Nennung von Begriffen aus der Kategorie 4 zeigt. Eine massive Verwendung von benachbarten Konzeptionen jenseits von Lichtstrahlen in den Erklärungen zu den beiden gezeigten Hebungsphänomenen kann dagegen als Ausweichverhalten interpretiert werden: Gelingt eine Erklärung im Strahlenkonzept nicht, wird stattdessen das Verhältnis der Brechung von Lichtstrahlen zu diesen Konzeptionen ausführlicher erläutert (c02-B, c02-C, e01-C, j01-C). Im Zusammenhang von fehlenden zentralen Elementen mit der Betrachtung nicht relevanter Elemente können die Aussagen von Redfors und Ryder (2001) folglich dahingehend präzisiert werden, dass nicht allein *ungeeignete Modelle* in den Erklärungen verwendet werden, sondern Elemente verschiedener Konzeptionen teilweise gleichzeitig in einem Modell zur Erklärung der gezeigten Phänomene eingesetzt werden. Den Studierenden scheint dabei jedoch klar zu sein, dass die Verwendung von Strahlen in Verbindung mit der Brechung ein zentraler Baustein in den Erklärungen ist, wie die häufige Verwendung von Lichtstrahlen auch in den Erklärungen zu den Hebungsphänomenen zeigt.

Diesbezüglich können auch die Ergebnisse von Andersson und Kärrqvist (1983) entweder auf die untersuchte Altersgruppe beschränkt oder als mittlerweile überholt betrachtet werden, da die Autoren nur bei höchstens einem Drittel der Teilnehmer einer untersuchten Jahrgangsstufe die Fähigkeit zum Erkennen der Brechung von Licht zur Erklärung von Hebungsphänomenen erkennen können.

Dahingegen fällt auf, dass der Begriff des ‘Bildes’ deutlich seltener, nämlich in weniger als der Hälfte aller Maps zu den Erklärungen der beiden Hebungsphänomene auftaucht. Dieses Fehlen muss so gedeutet werden, dass entweder das sichtbare Bezugsobjekt des Bildes nicht mit dem Begriff assoziiert

wird oder dieser Begriff nicht versprachlicht wird. Das Bild ist jedoch integraler Bestandteil des Konzepts der Bildentstehung für Anwendungszwecke beispielsweise im Rahmen von optischen Geräten. Galili und Hazan (2000) können in ihrer Untersuchung feststellen, dass Bilder genau wie Gegenstände für einen Teil der Physiklernenden körperliche Entitäten sind. Eine fehlende Trennung zwischen beziehungsweise eine fehlende explizite Benennung von Objekt und Bild macht eine Erklärung zumindest anfällig für eine solche Konfusion. Auf Basis dieser Deutung kann die Empfehlung ausgesprochen werden, die Rolle des Bildes in Lehr-Lern-Prozessen im Rahmen der geometrischen Optik explizit zu thematisieren. Hat sich für die Teilnehmenden dieser Begriff nicht in den Lehr-Lern-Prozessen etabliert, dann ist der Schluss auf die gegenständliche Natur von Bildern damit jedoch quasi denknotwendig: Wenn jemand das Bildkonzept in optischen Phänomenen nicht erkennt, muss das Bild als gegenständlich oder als Illusion interpretiert werden.

Welche Begriffe darüber hinaus in eine Erklärung auf Basis einer Beobachtung mit Hilfe einer Theorie eingebunden werden können und welche nicht, bereitet in der vorliegenden Untersuchung möglicherweise auch deswegen Schwierigkeiten, weil zum Beispiel im Gegensatz zu Multiple-Choice-Tests mit grafischem Antwortformat wie etwa bei Galili und Hazan (2000) oder Kaewkhong et al. (2010) hier keine Bausteine der Erklärung vorgegeben sind. Die Auswahl und Versprachlichung relevanter Elemente als Bestandteil des Modellierungsprozesses muss damit also völlig selbständig erfolgen.

Hier können dementsprechend vor allem mit dem im Kapitel 1 entwickelten Modellbegriff direkt Implikationen für Lehr-Lern-Umgebungen genannt werden, die dergestalt sind, dass die einzelnen Konzeptionen von Licht gemäß Passmore et al. (2014) eng mit den verschiedenen Einsatzzwecken verknüpft werden, also beispielsweise die Strahlenoptik mit der Bildentstehung, die Wellenoptik mit entsprechenden Interferenzerscheinungen und Photonen mit der Quantenoptik. Darüber hinaus bedingen sich ein gewisses konzeptuelles Verständnis und eine aus fachlicher Sicht strukturierte Beobachtung gegenseitig (Chalmers, 2007), woraus eine Forderung nach einer systematischen Phänomenerschließung abgeleitet werden kann, wie sie auf dem Gebiet der Optik beispielsweise durch phänomenorientierte Ansätze (z.B. Grebe-Ellis, 2006) realisiert wird.

Auch kann die Betrachtung der fehlenden zentralen Elemente und der nicht relevanten Elemente in einer Erklärung auf individueller Ebene genutzt werden, um die entsprechenden geeigneten Elemente als Grundgerüst bereitzustellen, damit sie in einer angemessenen Erklärung dann sprachlich miteinander verbunden werden können. Das heißt konkret, anhand der Map zu der sprachlichen Erklärung eines Probanden kann benannt werden, welche *elementaren* Veränderungen für eine angemessene Verwendung notwendig sind. Beispielsweise fehlen in der Erklärung des Probanden a03 zur Erklärung der scheinbar gehobenen Münze die zentralen Elemente 'Beobachter' und 'Bild', wohingegen die Stoffdichten von Luft und Wasser für die Bildentstehung nicht relevant sind. Insofern eignen sich kCMs sowohl auf individueller Ebene als auch in der Charakterisierung von Stichproben mit mehreren Probanden für Diagnose- und Therapiezwecke in Bezug auf das Auswählen der relevanten Elemente als zentraler Bestandteil des Modellierungsprozesses.

4.5.3 Fehlerhafte Beziehungen (FF2)

Die Verwendung fehlerhafter Beziehungen in den Erklärungen des gebrochenen Laserstrahls deutet vor allem auf eine fehlende Sicherheit im sprachlichen Umgang mit den beteiligten theoretischen Konzepten hin. Zwar können im Begleitmaterial, das ein Teil der Stichprobe (namentlich Teilnehmende der Vorlesung Physik für Biologen) in der zuvor besuchten Vorlesung erreicht bekam, explizit Übungen zur sprachlichen Darstellung von Beziehungen (z.B. in Form von Formulierungen von Abhängigkeiten) gefunden werden. Diese beziehen sich jedoch immer auf fiktive, also erdachte, Situationen und tauchen nie direkt im Zusammenhang mit selbst beobachteten Phänomenen auf. Darüber hinaus kann eine übermäßige Konzentration auf mathematische und gegebenenfalls grafische Übungen zur Brechung dazu führen, dass den Studierenden die sprachliche Darstellung schwer fällt, obwohl gerade die Darstellung in Textform und ein (flüssiger) Repräsentationswechsel wichtige Merkmale fachspezifischer Diskurse ist (vgl. u.a. Airey & Linder, 2009; Lemke, 1998; Van Heuvelen, 1991), die es zu erlernen gilt.

Eine weitere Unsicherheit zeigt sich vor allem in den Erklärungen zu den gezeigten Hebungsphänomenen. Verstärkt kommt es hierbei auch zu unzulässigen Vereinfachungen. Dabei wird das Phänomen mehr oder weniger ausführlich beschrieben und dann allein auf den Begriff der Brechung zurückgeführt, die zwar ihrerseits ebenfalls mehr oder weniger ausführlich beschrieben wird, aber die Verknüpfung der Phänomen- und der Theoriestruktur erfolgt eben nicht konkret. Das bedeutet, dass die Studierenden zwar wissen, *dass* die Brechung eine Rolle bei der Erklärung spielt, es ihnen aber nicht gelingt, diese Rolle konkret zu benennen. Selbst bei vorliegender Kenntnis der entsprechenden Theorie und trotz Wahrnehmung des Phänomens können diese beiden Teilstrukturen zumindest sprachlich nicht miteinander verbunden werden. Dadurch zeigt sich auch, dass eine bloße Vermittlung der entsprechenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten in Lehr-Lernsituationen nicht genügt, um Modelle beispielsweise im Rahmen von Erklärungen zu bilden, also Beziehungen zu Phänomenen herzustellen. Ferner ist auch die Drehung der Perspektive zwischen Darstellungen in Lehrbüchern (abgelöst, mit Möglichkeit zur Visualisierung von Strahlen bzw. Lichtwegen) und der Realsituation (in den Lichtweg eingebunden) als mögliche Ursache vor allem für die häufig inkorrekte Verknüpfung der theoretischen Begriffe mit der beobachteten Struktur zu nennen.

Werden die fehlerhaften Beziehungen, die fehlenden relevanten und die nicht relevanten Elemente im Zusammenhang betrachtet, so können die Ergebnisse auch vor dem Hintergrund eines diskursorientierten Rahmenkonzepts von Airey und Linder (2009) als eine mangelnde „Geläufigkeit“ oder „Leichtigkeit innerhalb einer kritischen Konstellation von Repräsentationen“ (engl.: „fluency in a critical constellation of modes“ S. 27f., Übers. d. Verf.) gedeutet werden. Dabei ist diese kritische Konstellation in den zentralen relevanten Elementen sowie deren Beziehungen zueinander zu sehen. Geläufig oder flüssig wäre eine Erklärung im Sinne der Autoren dann, wenn diese Elemente der Konstellation eben fachlich angemessen in Beziehungen zueinander gesetzt werden können. Dies betrifft zum einen sowohl das flüssige Verbinden relevanter Konzepte, als auch die oben bereits erwähnte Fähigkeit, vor-

handene mathematische oder grafische Fähigkeiten auch sprachlich umzusetzen.

Die inkorrekten Beziehungen in sprachlichen Erklärungen stehen darüber hinaus in Einklang mit den Ergebnissen von Kaewkhong et al. (2010), die zeigen, dass Objekt, Bild und Beobachter von Lernenden im Rahmen von anzufertigenden Skizzen nicht bzw. nicht fachlich korrekt mit Lichtstrahlen verbunden, also diese Objekte in Beziehung gesetzt werden, wobei dieses Ergebnis hier eben auch auf sprachlicher Ebene und ohne Vorgabe eines Teils der zu verbindenden Elemente belegt werden kann.

Das Verbinden der sichtbaren Struktur mit dem (nicht relevanten) Begriff der 'optischen Täuschung' deutet auf ein konzeptuelles Fehlverständnis entweder dieses Begriffs oder des physikalischen Zusammenhangs der gezeigten Erscheinung hin. Eine optische Täuschung kann gerade nicht mit Hilfe der Optik erklärt werden, sondern entsteht durch psychologische Prozesse. Auch die Verwendung von Beziehungen, in denen sich Lichtstrahlen *bewegen* würden, deutet auf ein konzeptuelles Fehlverständnis in Form einer Konfusion von Strahlen als ortsfeste Entitäten und Wellen als sich ausbreitende (und damit bewegende) Objekte hin. Diese Konfusion würde beispielsweise durch Verfahren zur Erfassung des fachlich-konzeptuellen Verständnisses der gezeigten Phänomene auf Basis von ikonischen Repräsentationen oder durch Multiple-Choice-Tests nicht ohne weiteres sichtbar werden, da bei ikonischen Repräsentationen zwar die räumliche Anordnung der Elemente, nicht jedoch deren zeitliche Änderung im Vordergrund steht, und in Multiple-Choice-Tests dafür eine eigene Antwortoption zur Verfügung gestellt werden müsste.

Darüber hinaus wäre ohne die explizite Analyse der Beziehungen nur sichtbar, ob und welche Begriffe der Theorie (z.B. Strahlen, Brechung, Brechungsindizes etc.) bzw. des Phänomens (Betrachter, Objekt, Wasseroberfläche etc.) verwendet werden. Erst die fachliche Bewertung der Beziehungen zeigt, *wie* dies in einer sprachlichen Erklärung geschieht. Dabei zeigt sich, dass es mannigfaltige und vor allem individuell unterschiedliche Möglichkeiten zur unsachgemäßen Verknüpfung dieser an sich relevanten Elemente gibt.

Ein konzeptuelles Verständnis aufzubauen bedeutet also mehr als nur ein systematisches Erlernen theoretischer Begriffe, bei dem zwar die entsprechenden fachspezifischen Termini bzw. deren gebräuchliche Konstellationen etabliert werden, nicht jedoch zwangsläufig die Beziehungen zwischen diesen Termini zur beobachtbaren Struktur von Phänomenen. Es bedeutet gleichzeitig, diese Konstellationen in verschiedene Anwendungs- und Erklärungszusammenhänge zu bringen und sie zu versprachlichen.

Eine mögliche Intervention kann darin bestehen, die Phänomenstruktur schrittweise mit den entsprechenden theoretischen Begriffen zu verbinden und die Verbindungen sprachlich darzustellen, etwa indem der Lichtweg vom Objekt durch die Wasseroberfläche zum Betrachter nachvollzogen wird, die räumliche Lage des Bildes relativ zum Objekt und zu den Lichtstrahlen beschrieben wird und der Vorgang der Bildentstehung bzw. Bildwahrnehmung in Zusammenhang mit dem Lichtweg und der relativen Objekt-Bild-Beobachter-Konstellations gebracht wird. Die Integration relevanter Elemente in ein Modell zur Erklärung von Phänomenen ist nach der Auswahl dieser Elemente der zweite, wesentliche Bestandteil von Modellbildungsprozessen, wie in Kapitel 2 dargestellt wurde. Daher ist dieser Schritt, mögliche Schwierigkeiten zu identifizieren und Implikationen daraus abzuleiten, von besonderer Be-

deutung.

4.5.4 Post-hoc-Analyse

Die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Rangsummen-Tests zeigen einen signifikanten Unterschied nur in dem Bereich *zwischen* Phänomen und Theorie (*'phtb'*) in Abhängigkeit davon, ob die Studierenden eine Erklärung zum (nach 'unten') gebrochenen Laserstrahl oder zum (nach 'oben') geknickten Bleistift abgeben. Solange also die Studierenden sprachlich Elemente innerhalb der Theorie oder innerhalb des Phänomens miteinander verknüpfen, spielt es keine Rolle, *welches* Phänomen sie dabei sprachlich erklären. Die Mediane der relativen Fehlerhäufigkeiten in diesen Bereichen liegen jeweils bei null. Die Beziehungen dort sind also überwiegend fehlerfrei. Sobald jedoch sprachlich Beziehungen *zwischen* Elementen des Phänomens und der Theorie aufgestellt werden, ist zumindest ein signifikanter Unterschied zwischen den Maps zu den Erklärungen zum Laserstrahl und zum Bleistift erkennbar, wobei der Median der Fehlerhäufigkeiten beim Laserstrahl am kleinsten ist. Das Verbinden von in dem Phänomen erkannten Elementen auf der einen Seite und theoretischen Begriffen auf der anderen Seite bereitet hier folglich wenig Schwierigkeiten, was plausibel ist, da der Laserstrahl den üblichen Abbildungen eines gebrochenen Lichtstrahls ähnelt und somit eine Verbindung zu den Konstituenten des Snelliusschen Brechungsgesetzes erleichtert. Beim Phänomen des scheinbar nach oben geknickten Bleistifts muss dagegen der Lichtweg über einen Wechsel der Perspektive erklärt werden (zum Wechsel der Perspektive siehe auch Müller & Schön, 2009). Weiterhin muss jeder Punkt des Bleistift als Ausgangspunkt eines Lichtbündels verstanden werden, der auf dem Weg zum Beobachter der Brechung an der Wasseroberfläche unterliegt. Darüber hinaus konfundieren die Richtungen der Knicke im Laserstrahl und im Bleistift miteinander. Die Signifikanz des Unterschieds in dem Bereich *'phtb'* zwischen diesen beiden Phänomenen ist damit auch inhaltlich gut erklärbar.

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test bestätigt den Bereich zwischen dem Phänomen und der Theorie als Hauptfehlerquelle. Mithilfe der beiden Tests kann erstmals die Anwendung theoretischen Wissens auf beobachtbare Phänomene, also die Beziehungen zwischen diesen beiden Bereichen, quantitativ als tatsächlicher Problembereich bestätigt werden, und das auf Basis von sprachlichem (qualitativem) Material mit einem relativ kleinen Stichprobenumfang!

Insgesamt zeigt sich, dass, wenn das fachgerechte Verbinden von Begriffen in sprachlichen Erklärungen als Gradmesser dient, der Bereich zwischen dem, was die Physiklernenden im Fall von optischen Phänomenen in der gezeigten Struktur erkennen, und dem, was sich in entsprechenden Lernprozessen für sie etabliert hat, als größte Schwierigkeit. Je komplexer dabei das Phänomen wird, desto schwerer fällt den Studierenden diese Verbindung. Oder anders ausgedrückt: Solange die Studierenden ihnen bekannte Konzepte wie die Brechung im Strahlenmodell erläutern, unterlaufen ihnen wenig Fehler. Dieses Wissen scheint jedoch einer gewissen Trägheit unterworfen zu sein, die verhindert, dass es auf komplexere Phänomene angewendet werden kann. Die verkürzten Bezüge ausgehend vom Phänomen einzig auf den Begriff der 'Brechung' belegen diese These inhaltlich. Weiterhin steht diese Deutung im

Einklang mit den Ergebnissen von Hüttebräuker (2010). Darin bereitet das Erstellen und Verändern der Anordnungen von Lichtstrahlen bei der Brechung wenig Schwierigkeiten im Gegensatz zur Einbindung des Brechungskonzeptes in Phänomenzusammenhänge.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass das vorliegende Datenmaterial Post-hoc geprüft wurde, also das Design der Untersuchung nicht von vornherein auf die Prüfung möglicher Hypothesen mit Ergebnissen der genannten Art angepasst wurde. Darüber hinaus muss die Unabhängigkeit der Stichproben diskutiert werden, da ein Proband jeweils zwei Erklärungen abgegeben hat. Eine Prüfung der Korrelation zeigt jedoch, dass sich eine Abhängigkeit in Form einer möglicher Aussage wie „je mehr Fehler ein Proband in der einen Erklärung macht, desto mehr Fehler macht er auch in der zweiten Erklärung“ nicht bestätigt.

Die Ergebnisse deuten auch hier darauf hin, dass es offenbar nicht genügt, in Lehr-Lernsituationen das für Erklärungen notwendige theoretische Wissen zu vermitteln, denn die Fehlerhäufigkeit in diesen Bereichen ist vergleichsweise gering. Stattdessen müssen Gelegenheiten zur *Anwendung* dieses spezifischen Wissens geschaffen werden, etwa in Form von Erklärungen sichtbarer Phänomene oder Prüfung von Vorhersagen auf Basis theoretischer Annahmen. Damit können die qualitativen Erkenntnisse also auch quantitativ gestützt werden. Gleichzeitig muss jedoch festgehalten werden, dass der überwiegende Teil der Beziehungen fachlich korrekt ist und damit zumindest Ressourcen für den Aufbau einer vollständigen, fachlich angemessenen Erklärung bietet, da eine ‘überwiegend richtige’ Erklärung eben nicht genügt.

Mögliche Unterschiede in den Fehlerhäufigkeiten zwischen den Phänomenen in den einzelnen Bereichen sowie zwischen den einzelnen Bereichen bei einem Phänomen können auf Basis entsprechender Untersuchungsdesigns mit größeren Stichproben geprüft werden. Vor allem in Zusammenhang mit der Art der Fehler (z.B. Verstoß gegen fachlich etablierte Prinzipien) sind weitere belastbare Erkenntnisse wünschenswert.

4.5.5 Besondere Ausprägungen formaler Merkmale der Maps (FF₃)

Fragmentierungen treten in den ursprünglichen Maps nur in acht der insgesamt 64 Concept Maps und damit vergleichsweise selten auf. Obwohl in den voneinander getrennten Fragmenten jeweils Elemente und Beziehungen auftauchen, die als sprachliche Ausdrücke miteinander verwandt sind, z.B. „Brechung“ in einem Fragment als Substantivierung von „wird gebrochen“ in einem anderen Fragment der gleichen Map, kann jedoch gezeigt werden, dass in den meisten Fällen mit diesen sprachlichen Ausdrücken unterschiedliche Konzepte bzw. Begriffe (nach Ogden & Richards, 1989) evoziert werden, die auch inhaltlich voneinander unterscheidbar sind. Das bedeutet, dass es den Studierenden in diesen Fällen von vornherein nicht gelingt, in einer sprachlichen Darstellung diese verschiedenen Begriffe miteinander zu verbinden, also beispielsweise das Konzept der „Brechung“ konkret auf das gezeigte Phänomen (B oder C) zu beziehen oder die Brechung (in A) in verschiedenen Konzeptionen miteinander in Zusammenhang zu bringen. Die Fragmentierung zeigt sich auch in einigen Concept

Maps von Physiklernenden bei Weber (2003) vor einer Intervention, wobei dort die Zerklüftung jedoch nicht inhaltlich gedeutet wurde.

In den bereinigten Maps zeigt sich, dass überwiegend theoretische Elemente oder Aussagen von den Hauptfragmenten abgetrennt sind, wovon insbesondere die Brechung als Begriff oder das Brechungsgesetz bzw. Teile dessen betroffen sind. Offenbar fällt es den Studierenden besonders schwer, diese übergeordneten oder konkreten theoretischen Elemente in einer sprachlichen Erklärung fachlich richtig in Beziehung zu ihren übrigen Teilen der Erklärung zu setzen. Das durch Lernprozesse erworbene Wissen über die Brechung von Licht wird zwar häufig durch Nennung des allgemeinen Konzepts „Brechung“ erwähnt, wie jedoch das, was unter diesem übergeordneten Konzept zusammengefasst wird, konkret im Zusammenhang mit dem beobachteten Phänomen oder mit anderen physikspezifischen Entitäten steht, scheint den Probanden nicht klar zu sein oder kann zumindest nicht sprachlich ausgedrückt werden. In einigen Fällen bereitet die Einbindung der „Wasseroberfläche“ als beobachtbares Element oder der Grenzfläche als theoretische Entsprechung in die Erklärung Schwierigkeiten. Die Wasseroberfläche hat unter anderem aufgrund ihrer Rolle als der Ort, an dem die Brechung auftritt, sowie aufgrund der Rolle ihrer Orientierung relativ zwischen Beobachter und Objekt eine besondere Bedeutung innerhalb der Erklärung. Diese physikalische Bedeutung scheint in den genannten Fällen nicht erkannt worden zu sein. Möglicherweise liegt eine Ursache dafür in der Tatsache, dass in der häufig anzutreffenden Strahlenskizze zur Erläuterung des Brechungsgesetzes diese Grenzfläche nur als Linie dargestellt wird und daher die Interpretation als orientierte Fläche zwischen Beobachter und Objekt schwer fällt.

Auch beim Zerfall in größere Fragmente zeigt sich in den Erklärungen zu den Phänomenen der gehobenen Münze und des geknickten Bleistifts, dass die Brechung als Konzept teilweise nur durch fachlich inkorrekte Aussagen mit der Phänomenbeschreibung verbunden ist (co2-B, co4-C).

Unabhängig vom konkreten Zerfall in einzelne Fragmente sind in einigen Maps die Phänomen- und Theoriebereiche nur schwach miteinander verbunden. Dabei ist auffällig, dass dieses sichtbare Verhalten probandentypisch zu sein scheint. Von den neun Maps, die davon betroffen sind, stammen acht von vier Probanden. Diesen Probanden gelingt es offenbar in beiden abgegebenen Erklärungen nicht, ihre Beobachtung und ihr beim Physiklernen erworbenes Wissen sprachlich angemessen miteinander in Beziehung zu setzen. Dieses Verhalten kann zum Teil auf fehlende zentrale Begriffe wie z.B. das Bild des Gegenstandes zurückgeführt werden, die dementsprechend auch nicht miteinander oder mit der übrigen Erklärung verbunden werden können. Teilweise ist die schwache Verbindung auch auf eine verkürzte Darstellung des Lichtweges zurückzuführen, der z.B. den Beobachter nicht mit einbezieht. Diese Ursache stünde in Einklang mit den Ergebnissen von Andersson und Kärrqvist (1983), die in den Erklärungen Physiklernender ebenfalls - allerdings ohne Brechung - unvollständige Lichtwege von der Quelle zum Beobachter identifizieren konnten. Die vergleichsweise schwache Verknüpfung wird insbesondere im Vergleich mit den Expertenerklärungen deutlich, in denen bis zu 58 Beziehungen (xo1-B) zwischen Elementen des Phänomens und der Theorie aufgestellt werden.

Die Fragmentierung kann auch vor dem Hintergrund des Rahmenkonzepts von Airey und Lin-

der (2009) gedeutet werden, die bei Physikstudierenden teilweise eine bloße Imitation von Diskursfragmenten („discourse imitation“, S.34f.) feststellen, welche zwar in sich korrekt wiedergegeben werden (wie im vorliegenden Fall z.B. sprachliche Formulierungen des Brechungsgesetzes), was jedoch zu Schwierigkeiten führt, wenn diese Diskursfragmente in eine neue Situation eingebettet oder dort angewendet werden müssen.

Die Expertenerklärung x02-A enthält nur theoretische Elemente. Diese Auffälligkeit kann dadurch erklärt werden, dass der Experte die Abbildung des gebrochenen Laserstrahls explizit als Stellvertreter für die Brechung von Lichtstrahlen allgemein betrachtet und diese allgemeinere Beschreibung der Brechung im Zusammenhang mit anderen Konzeptionen (z.B. Licht als Welle) darlegt, sich also gar nicht auf das gezeigte Phänomen bezieht sondern auf die durch das Verhalten des Lasers repräsentierten theoretischen Zusammenhänge. Gleichwohl kann auch die Erklärung x02-C des gleichen Experten als theorielastig bezeichnet werden, da auch hier die Zahl der theoretischen Elemente überwiegt. Diese Theorielastigkeit wird insbesondere im Vergleich zu der Experten-Erklärung zu x03-C deutlich, die nur Elemente des Phänomens enthält. Der Verweis auf die Theorie erfolgt indirekt durch Rückbezug des Verhaltens des geknickten Bleistifts auf das Phänomen der scheinbar gehobenen Münze, das der gleiche Experte in x03-B erklärt. In dieser Erklärung x03-B bleibt der Phänomenbereich mit 26 Elementen (gegenüber 12 theoretischen Elementen) dominant. Offenbar spiegeln sich bestimmte Neigungen oder Typen von Erklärern (mit einer Neigung zur Theorie von x02 oder einem phänomenologischen Ansatz von x03) in den Maps wider, wodurch die semantische Validität des Verfahrens gestützt wird.

4.5.6 Zwischenfazit und Ausblick

Die Beantwortung der Forschungsfrage FF1 hat gezeigt, dass es überwiegend theoretische, nicht relevante Begriffe aus benachbarten Konzepten der Optik sind, die in Erklärungen der gezeigten Phänomene eingebunden werden und der zentrale Begriff des ‘Bildes’ von Objekten besonders häufig fehlt. In der Analyse fehlerhafter Beziehungen (FF2) zeigt sich, dass hierbei vor allem verkürzte Zusammenhänge sowie vereinzelt ungeeignete Formulierungen von physikalischen Zusammenhängen oder Verstöße gegen fachlich etablierte Prinzipien als Defizite identifiziert werden können. Das fachlich korrekte Verknüpfen von Phänomen- und Theoriebegriffen stellt sich in einer Post-hoc-Analyse der vorliegenden Daten für die Studierenden als schwieriger heraus als das sachgemäße Verknüpfen nur von Phänomen- oder nur von Theorie-Begriffen, wofür qualitativ die in unzulässiger Weise verkürzten Darstellungen verantwortlich gemacht werden können. Schließlich zeigt sich, dass der ‘Rumpf’ von Erklärungen, also das, was durch die Bereinigung nach der fachlichen Bewertung und Kategorisierung noch von der Erklärung übrig bleibt, häufig fragmentiert ist bzw. nur noch eine schwache Verknüpfung von Theorie und Phänomen aufweist (FF3).

Vor dem Hintergrund des im ersten Teil dieser Arbeit entwickelten modellorientierten Rahmenkonzepts können Schwierigkeiten Physikstudierender beim Erstellen eines Modells zur (schriftlichen) Erklärung optischer Phänomene mit Hilfe von kategorienorientierten Concept Maps präzise beschrie-

ben werden. Dabei werden bestehende Forschungsergebnisse zu Modellen in Erklärungen, insbesondere im Bereich der Optik, teilweise bestätigt (namentlich Kaewkhong et al., 2010), präzisiert (Redfors & Ryder, 2001; Weber, 2003), beschränkt (Andersson & Kärqvist, 1983) oder erstmals auch in Form von schriftsprachlichen Erklärungen übertragen, was bislang teilweise nur in grafischen Antwortformaten bzw. in Multiple Choice-Tests möglich war (z.B. bei Galili & Hazan, 2000). Die Schwierigkeiten stellen sich dabei als sehr vielfältig und oft in Kombination vorliegend heraus. Teilweise werden nicht relevante Elemente benachbarter optischer Konzeptionen z.B. in Form von Wellen oder Feldern in die Erklärung der gezeigten Hebungsphänomene eingebunden, teilweise fehlen zentrale Elemente wie z.B. das 'Bild'. Es werden relevante Elemente fachlich inkorrekt in Beziehung miteinander gesetzt, wodurch die Erklärungen zerfallen können, sodass einige ihrer Teile nicht mehr miteinander verbunden sind. Das heißt, dass beispielsweise die Theorie gar nicht mehr in einem sprachlichen Zusammenhang mit dem beobachteten Phänomen steht. Gerade Beziehungen zwischen der Theorie und dem Phänomen sind von fachlichen Inkorrektheiten betroffen. Wenn jedoch dieses In-Beziehung-Setzen durch Auswahl und Integration von Teilen der beobachtbaren Welt und des etablierten, theoretischen Wissens ein zentrales, wesentliches Merkmal von Modellierungsprozessen ist, dann müssen die Ergebnisse trotz der Tatsache, dass in den meisten Erklärungen überwiegend relevante Elemente in fachlich richtige Beziehungen gesetzt werden, dahingehend gedeutet werden, dass das Modellieren selbst anhand von alltagsnahen Phänomenen Studierenden mit Physikbezug schwer fällt.

Kategorienorientierte Concept Maps sind besonders gut geeignet, die Struktur sprachlicher Erklärungen mit expliziter Berücksichtigung der darin repräsentierten Modelle darzustellen und Schwierigkeiten präzise zu benennen. Die Post-hoc-Analyse der relativen Häufigkeiten der fehlerhaften Beziehungen bestätigt dabei quantitativ den Bereich zwischen Phänomen und Theorie als hauptsächliche Bruchstelle. Zugleich zeigt sich darin eine unerwartete Stärke des Verfahrens, denn unter Beibehaltung eines Großteils der inhaltlichen Aussagekraft können auf Basis von qualitativem Material statistisch belastbare Aussagen getroffen werden, für die sonst (z.B.) erst noch zu entwickelnde Tests an größeren Stichproben eingesetzt werden müssen.

In der Diskussion der Ergebnisse zu den einzelnen Forschungsfragen konnten zudem jeweils Vorschläge gemacht werden, wie mögliche Interventionen zum Beheben der gezeigten Defizite allgemein aussehen können. Aus den Defiziten erwächst eine Forderung beispielsweise nach einer systematischen Phänomenerschließung, einem schrittweisen In-Beziehung-Setzen einzelner theoretischer und beobachtbarer Elemente, einer engen Verknüpfung von theoretischen Konzepten mit ihren angedachten Einsatzzwecken sowie einem damit verbundenen starken Anwendungsbezug dieser Konzepte und der Abgrenzung von benachbarten Konzepten.

Gleichzeitig bieten kCMs individuelles Diagnose- und Therapiepotenzial. So kann mit Hilfe der Maps anhand einer Anzahl von aus fachlicher Sicht zentralen Begriffen ein Grundgerüst für die Erklärung bereitgestellt werden, um es aus Sicht der Physiklernenden mit der eigenen Erklärung abzugleichen. Gleichzeitig kann gezielt auf irrelevante Elemente, fehlerhafte Beziehungen und auch fehlende Verbindungen zwischen Teilen der Erklärung hingewiesen werden. Darauf aufbauend ist es möglich,

zunächst gezielt Vorschläge für eine fachliche Korrektur anhand der Maps zu machen, die dann in eine sprachliche Erklärung eingebunden werden. In der Abbildung 4.6 wird z.B. ein Vorschlag dafür gemacht, wie mit Hilfe der vorhandenen Elemente ergänzt durch fehlende (zentrale) Elemente die in Abbildung 4.7 getrennten Phänomen- und Theoriebereiche der Erklärung co4-C miteinander durch fachlich korrekte Beziehungen verbunden werden können. Dadurch entsteht noch keine ideale Map, aber eine auf Basis der bereinigten Map von co4-C angemessene Version. Die überwiegende Zahl der Beziehungen liegt in diesem Vorschlag gewissermaßen expertenkonform zwischen den vormalig getrennten Bereichen. Dadurch wird auch die überwiegende Anzahl der Elemente in den beiden Bereichen in Beziehung zu dem jeweils anderen Bereich gesetzt. Auf dieser Grundlage kann dann beispielsweise wiederum eine angemessene sprachliche Erklärung erfolgen.

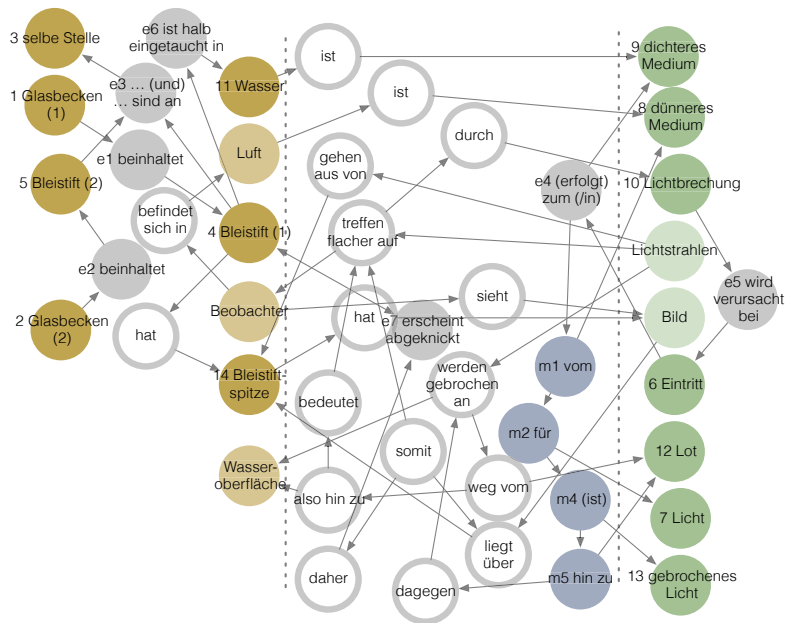


Abbildung 4.6: Beispiel für eine vervollständigte Map (co4-C), grau umrandete und heller eingefärbte Nodes entsprechen hinzugefügten Beziehungen und Elementen

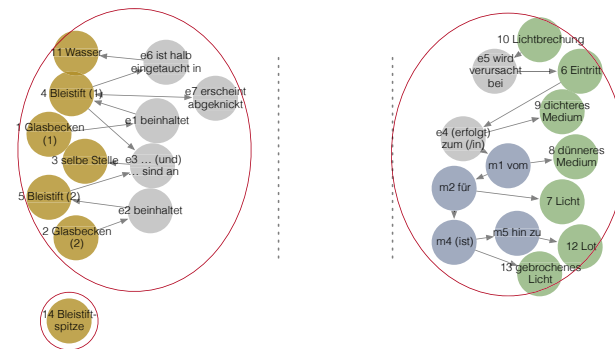


Abbildung 4.7: kCM co4-C (bereinigt und verkleinert, für den Vergleich zu Abb. 4.6)

5 FAZIT

Das Ziel dieser Arbeit war es, ausgehend von einem wissenschaftsorientierten Modellbegriff mithilfe eines geeigneten Verfahrens Schwierigkeiten Physikstudierender beim Modellieren präzise zu identifizieren. Ein solcher Modellbegriff kennzeichnet Modelle als von einer Person oder Gruppe für einen bestimmten wissenschaftlichen Zweck ausgewählte, verknüpfte Repräsentationen von Ausschnitten von Phänomenen und Theorien (Morrison, 1999; Passmore et al., 2014). Dementsprechend kann als Modellieren das Auswählen, Integrieren und Darstellen dieser Ausschnitte verstanden werden (Kircher, 2015; Passmore, 2015). Diese Formulierung bildet wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen kohärent ab, bei denen Wissenschaftler Beobachtungsdaten sammeln und strukturieren, prüfen, ob sich diese mit einer geeigneten Theorie widerspruchsfrei in ein Modell integrieren lassen, ob im Rahmen eines Modells auf Basis der Theorie Aussagen über Phänomene korrekt vorhergesagt werden können, oder ob gegebenenfalls eine Weiterentwicklung der Theorie oder weitere Phänomenexplorationen notwendig sind. Eine besondere Betonung liegt also auf der Zweckorientierung von Modellen.

Damit kann auch die eingangs dieser Arbeit angesprochene Inkongruenz bei der Verwendung des Begriffs ‘Strahlenmodell’ in schulischen Lehr-Lern-Situationen und im wissenschaftlichen Gebrauch erklärt werden. Strahlen an sich bilden kein Modell, aber sie können unter Berücksichtigung etablierter Aussagen, wie z.B. dem Brechungsgesetz, in ein Modell integriert werden, etwa zum Zweck einer Erklärung optischer Phänomene. Es bietet sich in dem Zusammenhang an, die wissenschaftliche Formulierung von Nolting (2013) als ‘Strahlenkonzept’ zu übernehmen, wenn damit zunächst nur innertheoretische Zusammenhänge elaboriert werden. Der Modellbegriff stellt somit eine elementarisierte, fachdidaktische Konzeption wissenschaftlicher Modelle dar, deren Zusammenhänge zu anderen fachdidaktischen Konzepten wie beispielsweise die des *Experimentierens* oder des *Argumentierens* noch auszuarbeiten sind. Eine solche integrierte Sichtweise ist eine wertvolle Basis für die Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen beim Physiklernen, zu der die vorgenommene Entwicklung eines authentischen Modellbegriffs somit einen wichtigen Beitrag leisten kann.

Aus dem entwickelten Modellbegriff konnte ein reliables und valides Verfahren abgeleitet werden, welches die Verwendung von Modellen in sprachlichen Erklärungen so darzustellen vermag, dass daraus präzise Aussagen über die in ihnen verwendete Modellstruktur gemacht werden können. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass ein Modell nicht mit einer seiner externen Repräsentationsformen gleichgesetzt und vollständig darin abgebildet werden kann. Aussagen aus dem entwickelten Verfahren beschränken sich daher auf die in sprachlichen Erklärungen repräsentierten Modellaspekte, die gegebenenfalls um weitere Aussagen aus visuellen oder formal-mathematischen Darstellungen ergänzt

werden können. Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch in ebenjenen sprachlichen Erklärungen, da für deren Analyse vor einem praxisorientierten Modellhintergrund bislang kein geeignetes Verfahren zur Verfügung stand. Aus dem entwickelten Verfahren entstehen Netzwerke, sogenannte kategorienorientierte Concept Maps, die eine weiterentwickelte Form von herkömmlichen Concept Maps darstellen. Die Darstellungsform ist aufgrund der expliziten Berücksichtigung der Phänomen-Theorie-Struktur geeignet, die Verwendung von Modellen in sprachlichen Erklärungen konsistent abzubilden. Diese Konsistenz zwischen einem praxisorientierten Modellbegriff und einem darauf aufbauenden Analyseverfahren ist ein wesentliches Merkmal dieser Arbeit.

Kategorienorientierte Concept Maps sind potenziell in der Lage, verschiedene Funktionen in naturwissenschaftlichen Lehr-Lern-Prozessen auszufüllen. Sie können als Diagnoseinstrument zur Identifikation und Lokalisierung von Schwierigkeiten beim Aufstellen von Erklärungen eingesetzt werden. Auch ein Einsatz zur konstruktiven Intervention auf Basis vorhandener Ressourcen ist denkbar, wie am Ende des Kapitels 4 an einem Beispiel gezeigt werden konnte. Und schließlich eignen sich kategorienorientierte Concept Maps als Lehrmittel zum Erstellen von angemessenen Erklärungen, indem beispielsweise auf der Basis vorgegebener Begriffe Beziehungen hergestellt und im Anschluss versprachlicht werden können (vgl. Hoban, 2015). Das Verfahren wurde zunächst auf Basis von Erklärungen zu Phänomenen der optischen Hebung mit Hilfe von Lichtstrahlen entwickelt und muss seine Leistungsfähigkeit in Bezug auf andere Phänomen- und Theorie-Bereiche erst noch zeigen. Da die dem Verfahren zugrundeliegende Phänomen-Theorie-Struktur sich jedoch nicht auf den Bereich der Optik beschränkt, sondern allgemein Modelle in naturwissenschaftlichen Kontexten kennzeichnet (Morrison, 1999), kann davon ausgegangen werden, dass die Anleitung zum Erstellen kategorienorientierter Concept Maps nach einer Anpassung an den jeweiligen Sachgegenstand prinzipiell übertragbar ist. Weitere, noch ausstehende Aufgaben bestehen darin, zu überprüfen, inwieweit durch das Verfahren abgebildete Fähigkeiten auch durch andere, etablierte Verfahren erfasst werden können (vgl. z.B. Andersson & Kärrqvist, 1983; Galili & Hazan, 2000; Hüttebräuker, 2010), wodurch sich gegebenenfalls die Validität des Instruments erhöhen würde, oder wie sich beispielsweise Lernprozesse - also Veränderungen - in kCMs widerspiegeln.

In der vorliegenden Arbeit wurden kategorienorientierte Concept Maps als Diagnoseinstrument eingesetzt, um Schwierigkeiten bei der Verwendung beziehungsweise beim Aufstellen von Modellen für eine sprachliche Erklärung optischer Phänomene mit Hilfe des Strahlenkonzepts aufzudecken. Den an der Untersuchung teilnehmenden Studierenden gelang dieser Modellierungsprozess teilweise nur unvollständig. Dabei zeigte das entwickelte Verfahren, dass sowohl die Auswahl der relevanten Elemente, insbesondere auf Seiten der Theorie, als auch vor allem die Integration dieser Elemente, also das sprachliche Verbinden, Schwierigkeiten bereitet. So gelang die Benennung und Integration des zentralen Elements des 'Bildes' vergleichsweise selten. In einigen Erklärungen wurde das beobachtete Phänomen verkürzt auf den Begriff der Brechung zurückgeführt, ohne diesen Zusammenhang zu explizieren. Mitunter wurden nicht relevante Begriffe aus anderen optischen Konzeptionen in das Modell eingebunden. Auch die Rolle der Grenzfläche wird nicht immer fachlich korrekt erkannt, was mög-

licherweise auf die eindimensionale Darstellung dieser Grenzfläche in der gängigen Strahlenskizze zurückgeführt werden kann. Unabhängig davon kann das Eliminieren von fehlerbehafteten Beziehungen und nicht relevanten Elementen gewissermaßen als Freilegen des Kerns einer Studierendenerklärung betrachtet werden. Dieser Kern zeigt sich oft fragmentiert. Einzelne Phänomen- oder häufiger Theorieausschnitte sind vom Rest der Erklärung isoliert. Die Brechung bzw. Elemente des Strahlenkonzepts tauchen in diesen Theorieausschnitten ebenfalls häufig auf.

Die Konsistenz des gesamten Forschungsvorhabens sowie der sich an der wissenschaftlichen Praxis orientierende Modellbegriff, auf dem das Vorhaben basiert, erlauben es, diese Beobachtungen vor dem Hintergrund eines wissenschaftlichen Modellverständnisses zu deuten. Wenn etwa Modelle Mediatoren zwischen Phänomenen und Theorien sind (Morrison, 1999), dann müssen diejenigen Erklärungen, in denen die Beziehungen zwischen Phänomen und Theorie nicht oder nur schwach vorhanden sind, als fachlich ungenügend zurückgewiesen werden. In einem anderen Kontext kann die Bedeutung der genannten Verkürzung bezüglich der Verknüpfung von Phänomenen und Theorien illustriert werden: Würde Nils Bohr versucht haben, die zu der Zeit bekannten Atomspektren allein mit dem Begriff „diskreter Energieniveaus“ zu erklären, würde dem nach ihm benannten Atommodell kaum Bedeutung beigemessen worden sein. Erst die elaborierte (und weitgehend sprachliche) Ausformulierung der betroffenen Zusammenhänge und die Fähigkeit des Modells, theoretische Überlegungen mit den Ergebnissen der Spektralanalysen (sowie mit weiteren beobachteten Phänomenen) in Einklang zu bringen, führte zu der wichtigen Stellung des Modells in der Entwicklung der Physik (Eckert, 2013).

In der vorliegenden Untersuchung war es die Aufgabe der Probanden, ein Alltagsphänomen mit einem einfachen, bereits im Physikunterricht der Sekundarstufe eingeführten, physikalischen Konzept zu erklären. Dass diese Erklärung sich bereits als komplexe Herausforderung darstellt, belegen die relativ umfangreichen Erklärungen der Experten mit einer starken Vernetzung von Theorie- und Phänomenbereich. Dass gerade diese Vernetzung bei den Studierenden vergleichsweise häufig fehlerbehaftet ist (im Vergleich z.B. zu der innertheoretischen Vernetzung), konnte in einer Post-hoc-Analyse bestätigt werden. In dieser Bestätigung zeigt sich somit auch eine weitere Stärke des Verfahrens, die darin besteht, ohne größeren Verlust qualitativer Informationen quantitative Aussagen über das beobachtete Verhalten treffen zu können.

Schließlich kann auch die Bedeutung der drei den Modellbegriff kennzeichnenden Merkmale durch die Ergebnisse der empirischen Untersuchung herausgestellt werden. Das Merkmal der Verknüpfung von Theorie und Phänomenen und deren Bedeutung wurde bereits mehrfach erwähnt. Die Bedeutung des zweiten Merkmals von Modellen für Lernprozesse, nämlich der Zweck- und Anwendungsorientierung von Modellen, zeigt sich darin, dass in den Ergebnissen der Untersuchung eine Verunsicherung bezüglich der Verwendung der einzelnen Lichtkonzepte erkennbar ist. Das Einbinden nicht relevanter Begriffe, beispielsweise aus dem Wellenkonzept, belegt, dass die Verknüpfung der einzelnen Konzepte (Strahlen, Wellen, Teilchen) mit ihren jeweiligen Einsatzzwecken auf der Phänomenseite (Hebung, Interferenzerscheinungen, Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie) den Studierenden nicht klar zu sein scheint. Wünschenswert wäre daher eine stärkere Zweckorientierung beim Modellieren

mit Hilfe der jeweiligen Konzepte. Und auch die Relevanz des dritten Merkmals, namentlich der Notwendigkeit einer Unterscheidung von Modellen und ihren Darstellungen, zeigt sich in den Ergebnissen der Untersuchung. So zeigen sich beispielsweise Defizite dabei, die Elemente des Brechungsgesetzes (als mathematische Darstellung) bzw. der Strahlenskizze (grafische Darstellung) in einer sprachlichen Darstellung sowohl miteinander als auch mit der erkannten Phänomenstruktur zu verbinden, oder etwa die häufig verwendete (abgelöste) Perspektive der Strahlenskizze zu variieren, um darin die relevanten, zentralen Elemente einzubinden. Das Modellieren erfordert in dieser Situation also, die verschiedenen Darstellungsweisen zweckgerichtet und flüssig miteinander kombinieren zu können, wofür gewissermaßen ein multimodales Modellverständnis notwendig ist.

Die drei genannten Merkmale kennzeichnen somit nicht nur Modelle in wissenschaftlichen Kontexten, sondern stellen sich auch als wesentlich für das Physiklernen mit Modellen heraus. Dadurch zeigt sich die Notwendigkeit, aber auch die Fruchtbarkeit der in der Einleitung geforderten Authentizität und konsistenten Verwendung eines Modellbegriffs in fachdidaktischen Untersuchungen.

Die auf Basis der Ergebnisse getroffenen Aussagen unterliegen bedingt durch das zugrundeliegende Rahmenkonzept, durch die Forschungsfragen und durch die Wahl der verwendeten Methoden gewissen Einschränkungen. Offen bleibt, inwieweit kategorienorientierte Concept Maps dazu eingesetzt werden können, auch andere Modi der Repräsentation (z.B. visuell, mathematisch), mit denen Modelle dargestellt werden können, einzubeziehen. So wurden etwa die von den Probanden erstellten Skizzen in dieser Arbeit nur als Hilfen bei der Identifikation von Elementen und Beziehungen in den Erklärungen benutzt. Ob und wie bestimmte Fähigkeiten der Modellierung gegebenenfalls auch oder nur in diesen Skizzen sichtbar werden, konnte hier nicht diskutiert werden. Das vorliegende Datenmaterial wäre prinzipiell dazu geeignet, da mehrere Probanden neben ihrer sprachlichen Ausführung auch solche Skizzen erstellt haben. Vor dem Hintergrund des linguistischen Konzepts von Ogden und Richards (1989, semiotisches Dreieck) können überdies nicht in allen Fällen präzise Aussagen darüber gemacht werden, ob die gefundenen Schwierigkeiten im Erkennen des Konzepts bzw. Begriffs zu verorten sind oder in der Versprachlichung von erkannten Konzepten oder Begriffen. Aus diesem Grund beschränken sich die in der Arbeit getroffenen Aussagen häufig auf die Erklärung als sprachliches Produkt und lassen nur eingeschränkt Rückschlüsse auf kognitive Ressourcen zu. Diese können gegebenenfalls, wie oben dargestellt, durch einen multimodalen Zugang erschlossen werden. Weitere offene Fragen betreffen die bereits genannte Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere physikalische oder überhaupt naturwissenschaftliche Phänomene, das Verhältnis des Verfahrens gegenüber anderen Methoden zur Einschätzung des konzeptuellen Verständnisses von Phänomenen, eine empirische Einschätzung von kCMs als Interventions- und Lehrmittel oder als Diagnosewerkzeug beispielsweise in Längsschnittuntersuchungen. Erforderlich für Vorhaben dieser Art ist eine automatisierte Methode zum Erstellen der Maps aus den Kodiertabellen, da deren händische Erstellung in noch größerem Umfang sehr zeitaufwändig ist.

Anhänge

A PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Inhalt des Kapitels

A.1	Beschreibung der Brechung im Wellenkonzept	II2
A.2	Beschreibung der Brechung im Strahlenkonzept	II3
A.3	Beschreibung der Brechung mit dem Fermatschen Prinzip	II4
A.4	Optische Hebung	II4

Im Folgenden wird die ‘Brechung von Licht’ in verschiedenen physikalischen Konzepten, namentlich im Wellenkonzept, im Strahlenkonzept und mit dem Fermatschen Prinzip, überblicksartig dargestellt. Auf eine mathematische Herleitung der Brechung von Lichtstrahlen nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz aus den beiden anderen Konzepten wird hier verzichtet, da Herleitungen dieser Art in vielen Lehrbüchern nachvollzogen werden (u.a. Demtröder, 2009; Nolting, 2013). Stattdessen werden die zentralen Zusammenhänge und physikalischen Konzepte sprachlich dargelegt und relevante Begriffe auf Basis der Darlegung und der Abbildungen herausgestellt.

A.1 BESCHREIBUNG DER BRECHUNG IM WELLENKONZEPT

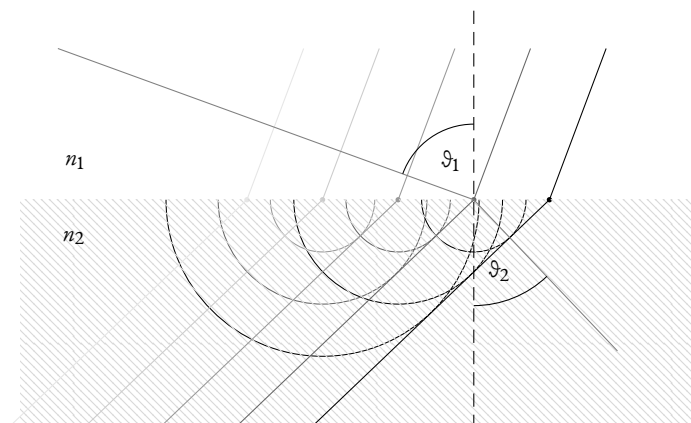


Abbildung A.1: Brechung ebener, elektromagnetischen Wellen am Übergang zwischen zwei Medien mit den Brechzahlen n_1 und n_2 , Einfallswinkel ϑ_1 , Brechungswinkel ϑ_2 . Reflektierte Wellen sind in dieser Abbildung nicht dargestellt.

Elektromagnetische Wellen mit der Wellenlänge λ erfahren beim Übergang aus einem Medium mit n_1 in ein Medium mit n_2 eine messbare Veränderung ihrer ursprünglichen Phasengeschwindigkeit c_1 nach

$c_1 \cdot n_1 = c_2 \cdot n_2$. Die Betrachtung ebener Wellen wird durch große Abstände der Wellenfronten vom Erreger oder durch ausgedehnte, ebene Erregerfronten ermöglicht. Die einfallenden Wellen regen elementare Dipole in dem Medium zum Schwingen an, welche dadurch ihrerseits verzögert selbst elektromagnetische Wellen aussenden. Diese überlagern sich mit den einfallenden Wellen zu resultierenden Wellen mit einer insgesamt verzögerten Ausbreitungsgeschwindigkeit. Mit dem Huygensschen Prinzip, nach dem jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle ist, kann grafisch ein Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten und der Richtungsänderung hergestellt werden (siehe Abb. A.1).

Die Richtungsänderung der Wellen ergibt sich dabei aus den Stetigkeitsbedingungen elektromagnetischen Felder an der Grenzfläche zwischen zwei linearen homogenen Medien i mit den Brechungsindizes $n_i = \sqrt{\epsilon_{r,i} \mu_{r,i}}$, wobei $\epsilon_{r,i}$ die relative Dielektrizitätszahl und $\mu_{r,i}$ die relative Permeabilität des Mediums i sind. In der Abbildung A.1 sind die einfallenden Wellen und die gebrochenen Wellen dargestellt, reflektierte Wellen nicht. Die Ausbreitungsrichtungen, die senkrecht zu den Phasenfronten verlaufen, schließen jeweils einen Winkel ϑ_i zur Normalen ein, für die das Snelliussche Brechungsgesetz gilt. Im Wellenbild verändert sich die Wellenlänge λ , die in der Abbildung A.1 dem Abstand zwischen den Flächen gleicher Phase entsprechen, die Frequenz jedoch bleibt gleich.

A.2 BESCHREIBUNG DER BRECHUNG IM STRAHLENKONZEPT

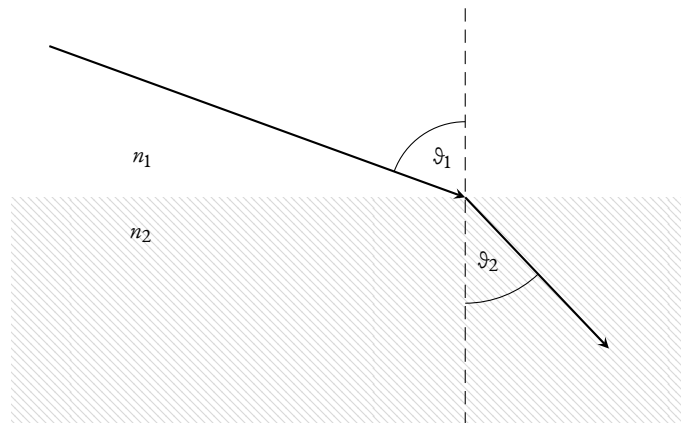


Abbildung A.2: Brechung von Strahlen am Übergang zwischen zwei Medien mit den Brechzahlen n_1 und n_2 , Einfallswinkel ϑ_1 , Brechungswinkel ϑ_2

Im Strahlenkonzept wird das Verhalten von Licht mit geradlinigen Lichtbündeln betrachtet, bei denen die Geometrien der betrachteten Probleme deutlich über den Größenordnungen der Wellenlängen liegen. Realisieren lassen sich solche Anordnungen beispielsweise durch Laser, deren Licht an Oberflächen oder Partikeln in Substanzen gestreut und dessen Bahn somit für einen Beobachter sichtbar gemacht wird oder durch Schattengrenzen (siehe z.B. Grusche & Wagner, 2016). Empirisch können mit dem Strahlenkonzept die Brechungsindizes von Substanzen auf Basis der observablen Lichtablenkung ermittelt werden. Die Richtungsänderung beim Übergang zwischen zwei Medien mit verschiedenen Brechungsindizes (siehe Abb. A.2) wird innerhalb des Strahlenkonzepts durch das Snelliussche Brechungsgesetz beschrieben, kann jedoch nur unter Rückgriff auf das Wellenkonzept (etwa durch Änderung der Wellenlänge) begründet werden. Das Brechungsgesetz für den Übergang zwischen zwei Medien mit den Brechungsindizes n_1 und n_2 für einen Strahl, der unter dem Winkel ϑ_1 zum Lot auf die Grenzfläche einfällt und unter dem Winkel ϑ_2 zum Lot wieder austritt lautet:

$$n_1 \sin \vartheta_1 = n_2 \sin \vartheta_2 \quad (\text{Snelliussches Brechungsgesetz})$$

Wenn Lichtstrahlen, wie z.B. von Hecht (2009) erläutert, als fiktionale, theoretische Entitäten ohne reale, physische Entsprechung betrachtet werden müssen, dann kann die Brechung von Lichtstrahlen in der Auslegung des in dieser Arbeit verwendeten Begriffs 'Phänomen' als beobachtbarer Ausschnitt der Realität nicht als Phänomen bezeichnet werden, sondern eben als innertheoretische Beschreibung.

A.3 BESCHREIBUNG DER BRECHUNG MIT DEM FERMATSCHEN PRINZIP

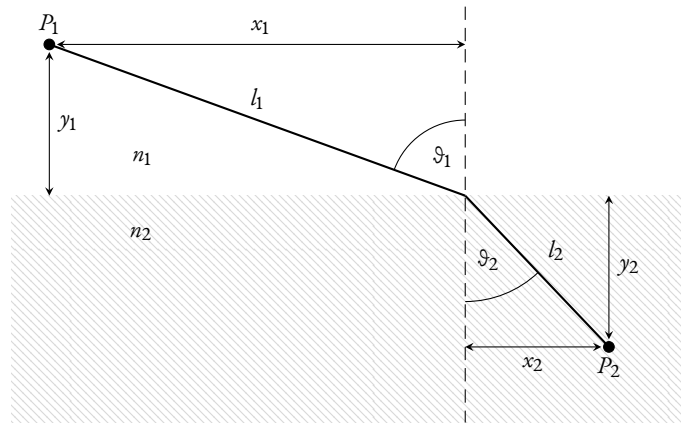


Abbildung A.3: Lichtweg $l_1 + l_2$ zwischen den Punkten $P_1(x_1, y_1)$ und $P_2(x_2, y_2)$ bei der Brechung mit dem Fermatschen Prinzip zwischen zwei Medien mit den Brechzahlen n_1 und n_2 , Einfallswinkel ϑ_1 , Brechungswinkel ϑ_2

Mit dem Fermatschen Prinzip werden Lichtwege zwischen zwei Punkten beschrieben. Es besagt, dass sich Licht zwischen diesen Punkten auf dem extremalen optischen Weg ausbreitet, der jedoch nicht zwangsläufig dem kürzesten Weg entspricht, sondern die unterschiedlichen Lichtgeschwindigkeiten in den Medien berücksichtigt. Im Unterschied zur konventionellen Strahlenoptik liegt hierbei eine finale Konstellation vor (Erb, 1992) vor: Es gibt zwischen zwei Punkten P_1 und P_2 in unterschiedlichen Medien genau einen Weg mit einer (hier) minimalen Laufzeit, wodurch der Lichtweg ($l_1 + l_2$) und somit der Ort des Durchgangs durch die Grenzfläche und die Winkel (ϑ_1 und ϑ_2) festgelegt werden. Dahingegen wird in der Beschreibung der Brechung im Strahlenkonzept ohne das Fermatsche Prinzip das Verhalten von Strahlen nicht final, sondern lokal beschrieben: ausgehend von einem Punkt fällt ein Lichtstrahl an einem anderen Punkt unter einem bestimmten Winkel zum Lot auf eine Grenzfläche und verläuft danach unter dem Brechungswinkel zum Lot weiter.

Zentrale Elemente: Als konzeptübergreifende zentrale Elemente der Brechung können damit das *Brechungsgesetz* selbst, eine *Grenzfläche* zwischen zwei Medien, beispielsweise *Luft* und *Wasser*, mit verschiedenen *Brechungsindizes*, *Licht* als übergeordneter Begriff, *Strahlen* oder Lichtbündel sowie das *Lot* als Orientierungsobjekt angesehen werden. Dies sind damit die auch direkt in der Abbildung A.2 erkennbaren Elemente sowie die übergeordneten Begriffe 'Licht' und 'Brechungsgesetz'. Die Winkel zwischen dem Lot und dem Strahl sind zwar ebenfalls zentral, können in sprachlichen, eher qualitativen Formulierungen zur Beschreibung der Brechung unter Umständen nicht explizit genannt werden (z.B. 'hin zum Lot', 'weg vom Lot').

A.4 OPTISCHE HEBUNG

Als Phänomen der optischen Hebung wird das Auseinanderfallen der sichtbaren und tastbaren Lage von punktförmigen Objekten bezeichnet, wenn der Beobachter bzw. ein abbildendes System aus Linse und

Projektionsfläche und das Objekt sich in unterschiedlichen Medien befinden. Dabei gelten folgende Voraussetzungen: 1.) Es muss ein punktförmiges Objekt vorhanden sein. 2.) Es muss einen Beobachter bzw. ein abbildendes System (beim Beobachter: Auge) geben. Und 3.) Es muss sich mindestens ein Übergang zwischen Medien mit unterschiedlicher Brechzahl zwischen dem Objekt und dem Beobachter befinden, wobei die Normale des Übergangs nicht parallel zur optischen Achse des abbildenden Systems, also etwa zur Blickrichtung, ausgerichtet sein darf.

Für abbildende Systeme wie im vorliegenden Fall liegen Entfernungen und Ausdehnungen deutlich über der Wellenlänge. Deshalb wird die Bildentstehung an Spiegeln und Linsen und insbesondere das Phänomen der optischen Hebung üblicherweise im Rahmen der geometrischen Optik, etwa mit Hilfe von Lichtstrahlen bzw. Strahlenbündeln erklärt. Eine Linse, wie z.B. die Augenlinse, bildet einen Objektpunkt in einem Bildpunkt auf einer Projektionsfläche (Netzhaut) auf Basis des auf sie auftreffenden Lichts ab. Die Richtung des auftreffenden Lichts von einem Objektpunkt, das sich in einem anderen Medium befindet, ist an der Grenzfläche jedoch verändert worden, wobei diese Veränderung der Richtung dem Snelliusschen Brechungsgesetz folgt. Im Vergleich scheint der Ausgangspunkt des Objekts weiter oben zu liegen, als er sich tatsächlich und tastbar befindet, da die Richtung des gebrochenen Lichts bei Austritt aus einem Medium mit höherem Brechungsindex flacher in Bezug auf den Übergang verläuft.

Von einer optischen *Hebung* im wörtlichen Sinn, also einer scheinbaren Veränderung der Position eines Objekts in der Vertikalen, kann nur gesprochen werden, wenn der Medienübergang zwischen Objekt und abbildendem System ebenfalls in einer Vertikalen stattfindet, also eine Grenzfläche horizontal ausgerichtet ist. Anderenfalls handelt es sich um eine scheinbare Verschiebung, wie etwa beim seitlichen Einblick in ein Aquarium.

Eine genaue Analyse des Bildes eines Gegenstandes unter Wasser zeigt, dass es nicht ein einzelnes Bild eines sich unter Wasser befindlichen Gegenstandes gibt, sondern einen ganzen Bildraum, innerhalb dessen die Bilder unterschiedliche Helligkeiten aufweisen (Quick et al., 2015). Dieser Bildraum wird beim Einblick mit Hilfe eines ausgedehnten optischen Abbildungssystems wie oben beschrieben von zwei Grenzbildern beschränkt, dem sagittalen und dem meridionalen Bild (Abb. A.4 und A.5). Dabei entsteht das sagittale Bild durch die Querausdehnung des abbildenden Systems und liegt exakt über dem Objekt. Das meridionale Bild hingegen beruht auf der vertikalen Ausdehnung des Systems und ist im Vergleich zum sagittalen Bild dem Betrachter etwas entgegengerückt.

Bei der Wahrnehmung des Bildes durch den Menschen muss berücksichtigt werden, dass hier die Wahrnehmung mit Hilfe von zwei abbildenden Systemen (bei zwei Augen) erfolgt und somit die Ausrichtung dieses Gesamtsystems Einfluss auf die konkrete Bildwahrnehmung hat. Beim Durchblick durch den Übergang auf ein Objekt von schräg oben liegen beide Augen auf einer Linie parallel zum Übergang, wodurch die Querausdehnung des gesamten Systems vergrößert wird und somit die sagittale Hebung dominiert (vgl. Quick & Grebe-Ellis, 2011). Dahingegen überwiegt beim seitlichen Einblick beispielsweise in ein Aquarium die meridionale Hebung, da hierbei die Ausdehnung lotrecht zur Grenzfläche im Vergleich zur parallelen Ausdehnung vergrößert wird.

Überdies hängt die Lage des Bildes noch von der Frequenz des Lichts ab, da Licht unterschiedlicher Frequenz an Grenzflächen unterschiedlich stark gebrochen wird, wodurch beispielsweise das 'violette Bild' eines Gegenstandes am stärksten gehoben erscheint. Schließlich soll die Voraussetzung einer zeitlich stabilen Konstellation von Objekt, abbildendem System und Übergang genannt werden, die für die ortsfeste Bildwahrnehmung erforderlich ist und beispielsweise bei einer bewegten Wasseroberfläche nicht mehr gegeben ist.

Für die optische Hebung eines punktförmigen Gegenstandes ist nicht zwangsläufig eine sprunghafte Veränderung des Brechungsindex notwendig; das Phänomen tritt auch bei kontinuierlichen Übergängen auf. Ausgedehnte Gegenstände hingegen verändern beim Durchblick durch einen graduellen Übergang neben ihrer scheinbaren Position auch ihre Form: Sie wirken gekrümmt. Das gleiche gilt auch für ausgedehnte Objekte an sprunghaften Übergängen, wenn dabei nicht mehr von annähernd gleichen Einblickswinkeln

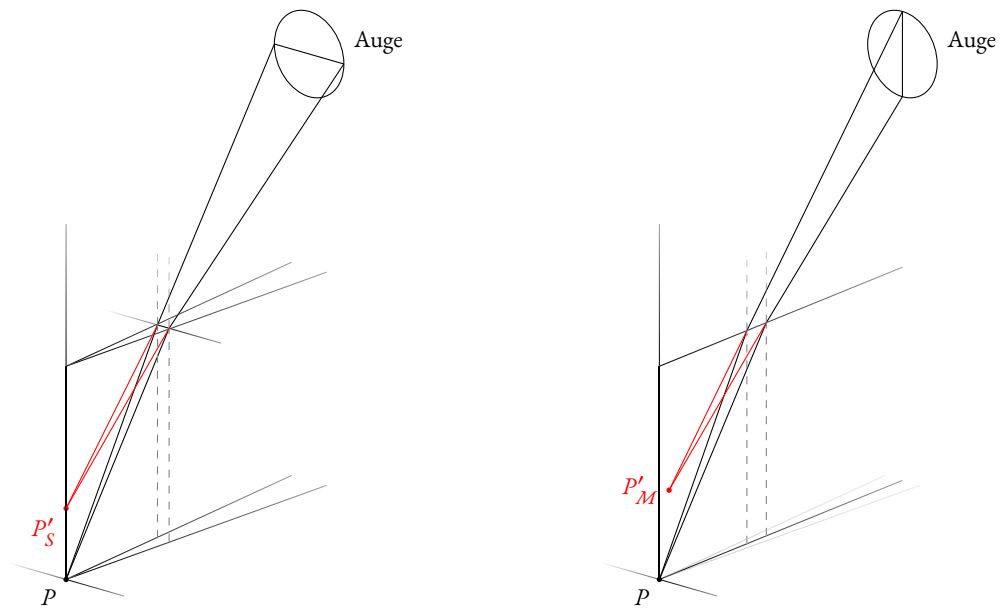


Abbildung A.4: Schematische Darstellung der sagittalen Hebung (links) und meridionalen Hebung (rechts) in einer Schrägperspektive mit dem Gegenstandspunkt P und den Bildpunkten P'_S (sagittal) und P'_M (meridional); die Neigung des Auges gegen die Wasseroberfläche wird hier vernachlässigt.

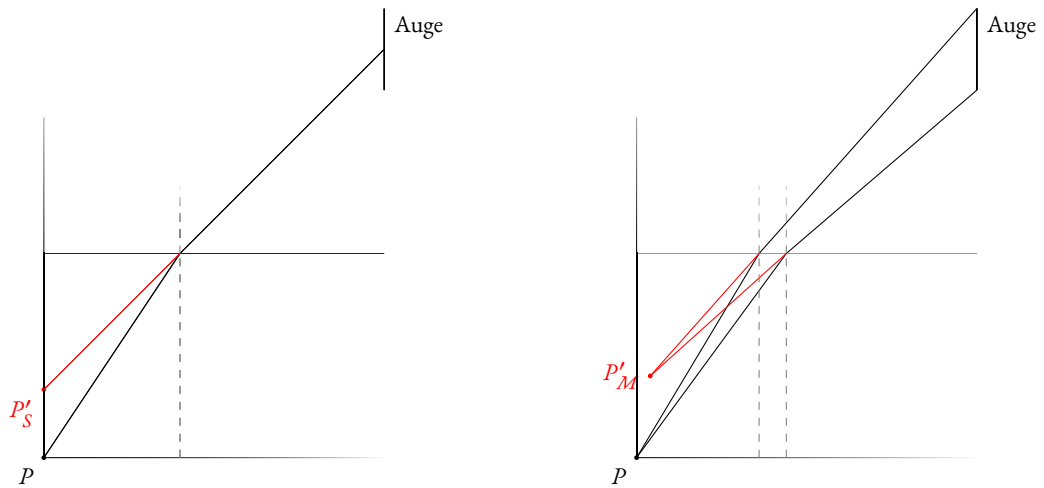


Abbildung A.5: Schematische Darstellung der sagittalen Hebung (links) und meridionalen Hebung (rechts) in einer Seitenansicht mit dem Gegenstandspunkt P und den Bildpunkten P'_S (sagittal) und P'_M (meridional); die Neigung des Auges gegen die Wasseroberfläche wird hier vernachlässigt.

für alle Teile des Objekts ausgegangen werden kann. Daher wirkt beispielsweise der Boden eines mit Wasser gefüllten Schwimmbeckens gekrümmt (und gehoben).

Auf Basis dieser Ausführungen können die folgenden, ebenfalls in der Abbildung A.4 zur Erklärung von Hebungsphänomenen erkennbaren, Elemente und die Zusammenhänge zwischen ihnen aus fachlicher Sicht als zentral für eine Erklärung des Phänomens der Hebung angesehen werden: das *Objekt*, das sonst nichts abgebildet werden würde, der *Beobachter* bzw. sein Auge oder ein abbildendes System, das wahrgenommene *Bild* des Objekts, der *Übergang* bzw. die Grenzfläche oder Wasseroberfläche, da ohne diese das wahrgenommene Bild und die tatsächliche Position zusammenfallen, die beteiligten Medien *Luft* und *Wasser* sowie *Strahlen*, Lichtstrahlen oder Lichtbündel als elementares Hilfsmittel zur Beschreibung der Richtungen.

B KODIERMANUAL

Inhalt des Kapitels

B.1	Einleitung	118
B.2	Erster Schritt: Identifikation der Elemente	119
B.2.1	Erster Teilschritt: Text lesen	120
B.2.2	Zweiter Teilschritt: Nomen und Pronomen markieren	121
B.2.3	Dritter Teilschritt: Nomen und Pronomen auflisten	122
B.2.4	Vierter Teilschritt: Ersetzen von Pronomen durch Nomen	123
B.2.5	Fünfter Teilschritt: Transformation von Nomen zu Elementen	124
B.3	Zweiter Schritt: Kategorisierung der Elemente	125
B.3.1	Sechster Teilschritt: Einordnen der Elemente in Kategorien	125
B.4	Dritter Schritt: Identifikation der Beziehungen	127
B.4.1	Siebenter Teilschritt: besitzanzeigende Beziehungen zwischen Elementen identifizieren	128
B.4.2	Achter Teilschritt: weitere Beziehungen zwischen Elementen identifizieren	129
B.4.3	Neunter Teilschritt: Beziehungen zu anderen Beziehungen identifizieren	129
B.5	Vierter Schritt: Fachliche Bewertung der Aussagen	131
B.5.1	Zehnter Teilschritt: Propositionen aus fachlicher Sicht bewerten	131
B.6	Kodierregeln	133
B.7	Glossar grammatikalischer Begriffe	134

B.1 EINLEITUNG

ZIEL

Kategorienorientierte Concept Maps (kCMs) sollen die fachliche Struktur eines Textes gemäß dem modellorientierten Rahmenkonzept sichtbar machen. Das heißt:

1. Die Elemente sollen identifiziert und visualisiert werden.
2. Die identifizierten Elemente sollen kategorisiert und die Kategorien sichtbar gemacht werden.
3. Beziehungen zwischen den Elementen sollen identifiziert und visualisiert werden.
4. Die Propositionen sollen aus fachlicher Sicht bewertet und die Bewertung sichtbar gemacht werden.

Das Kodiermanual ist eine Anleitung für die Schritte anhand eines Beispieltexes aus einem Lehrbuch.

VORAUSSETZUNG

Das Ausgangsmaterial soll in Form eines schriftlichen Textes vorliegen, gegebenenfalls inklusive einer Skizze. Der Text soll aus Sätzen bestehen, die gemäß der deutschen Grammatik korrekt aufgebaut sind. Bei fehlerhaften Sätzen ist zunächst zu prüfen, ob die nachfolgend dargelegten Arbeitsschritte durchgeführt werden können. Ist dies nicht der Fall, soll die betroffene Texteinheit ggf. unter Absprache mehrerer Kodierer und unter Beibehaltung des Sinngehalts in eine korrekte grammatikalische Form gebracht werden. Eine gegebenenfalls beiliegende Skizze dient in dieser Arbeit der Unterstützung bei der Zuordnung unklarer Begriffe oder Beziehungen. Skizzen werden jedoch nicht gesondert analysiert.

WICHTIGE BEGRIFFE

Eine *Concept Map* ist eine visuelle Strukturdarstellung in Form eines Netzwerkes. Ein solches Netzwerk besteht aus Konzepten (Knoten, engl. ‘nodes’) und gerichteten Beziehungen (Kanten, ‘edges’) zwischen den Knoten. Gemäß dem kategorienorientierten Rahmenkonzept besteht ein Modell zur Erklärung eines Phänomens aus *Elementen* (Konzepten) und *Beziehungen* zwischen diesen Elementen. Sowohl die Elemente als auch die Beziehungen werden in einer kCM als Knoten dargestellt. Die Verbindung der Beziehungen mit den Elementen oder von Beziehungen untereinander werden als Pfeile dargestellt (siehe Abbildung B.1).

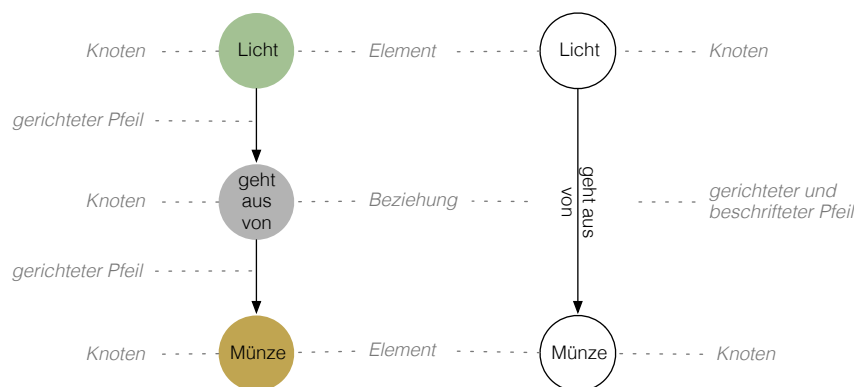


Abbildung B.1: Gegenüberstellung von Propositionen in kategorienorientierten Concept Maps (links) sowie herkömmlichen Concept Maps (rechts)

Elemente liegen im Text als Nomen oder stellvertretende Pronomen vor, *Beziehungen* in Form von Verbünden aus Verben, Adjektiven bzw. Adverbien. Eine Beziehung mit zwei oder mehreren dazugehörigen Elementen wird als *Proposition* ('Aussage') bezeichnet. In Abbildung B.1 lautet die Proposition "Licht geht aus von Münze". Eine Proposition stellt eine Sinneinheit dar. Sie kann auf ihre fachliche Richtigkeit überprüft werden. Eine Beziehung eines Elements zu sich selbst (z.B.: "Lichtstrahl ist geknickt") wird als *Schleife* bezeichnet und stellt ebenfalls eine auswertbare Proposition dar. Eine Beziehung zu einer Beziehung ist eine *Metabeziehung*.

B.2 ERSTER SCHRITT: IDENTIFIKATION DER ELEMENTE

Die Transformation eines Textes in eine kCM bedeutet nach der erfolgten Begriffsfestlegung zunächst, die Elemente und Beziehungen in dem Text zu identifizieren, aufzulisten und zu visualisieren.

B.2.1 Erster Teilschritt: Text lesen

REGEL

Der Text soll gegebenenfalls mehrfach gelesen werden. Dabei sind erste Auffälligkeiten (wie z.B. Unklarheiten) zu notieren. Textbestandteile, die aus fachlicher Sicht keine Bedeutung tragen (wie z.B. Redewendungen, Kommentare usw.), können gestrichen werden.

BEISPIEL

Der Beispieltext für eine Erklärung des Phänomens eines gehoben erscheinenden Gegenstandes sowie die dazugehörige Skizze wurde aus Boysen (1992, S. 34) entnommen.

“Sehen wir uns ein Lichtbündel an, das von einem Gegenstand unter Wasser, z.B. von einer Münze, ausgeht und in unser Auge gelangt: Wenn das Lichtbündel schräg auf die Wasseroberfläche fällt, wird es an der Grenzfläche Wasser - Luft gebrochen. Unser Gehirn geht aber aufgrund der Erfahrung davon aus, daß sich Licht geradlinig ausbreitet. Es verlegt deshalb den Ausgangspunkt des Lichtbündels an eine andere Stelle; wir nehmen den Gegenstandspunkt dort wahr, wo sich die rückwärts verlängerten Randstrahlen des gebrochenen Lichtbündels schneiden. Wir sehen ein virtuelles Bild des Gegenstandes, der Gegenstand ist scheinbar angehoben.”

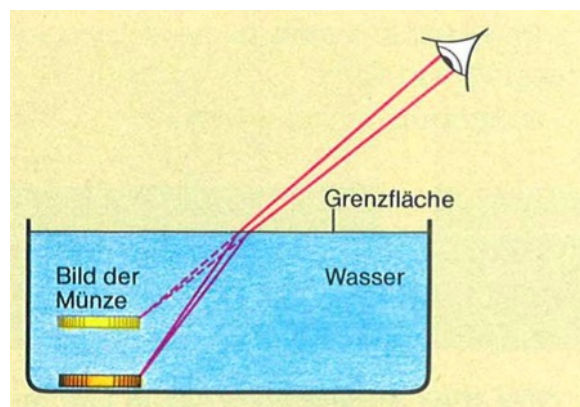


Abbildung B.2: Abbildung zur Erklärung der optischen Hebung einer Münze in Boysen (1992, S. 34)

B.2.2 Zweiter Teilschritt: Nomen und Pronomen markieren

REGEL

Alle Nomen sowie die Pronomen werden im Text mit den dazugehörigen Adjektiven markiert.

SONDERFÄLLE, AUSNAHMEN UND HINWEISE

1. *Ausnahme:* Wörter wie ‘Beispiel’ in “z.B.”, ‘Rolle’ in “spielt eine Rolle” oder ‘Allgemeines’ in “i.A.” sollen nicht als Nomen markiert werden, wenn sie nicht in Beziehung zu anderen Elementen gesetzt werden.
2. *Hinweis:* Bei Kompositionen aus mehreren Substantiven sollen die Substantive einzeln markiert werden, wenn es sich dabei um eine Verknüpfung von Entitäten handelt, die aus fachlicher Perspektive voneinander unterschieden werden können und wenn mindestens eine der Entitäten im Text an anderer Stelle einzeln verwendet wird.

Bsp.: “Grenzfläche Luft-Wasser” (→Grenzfläche, →Luft, →Wasser)

3. *Hinweis:* Pronomen können in sehr unterschiedlichen Formen und Situationen auftauchen. Zu beachten sind die Beispiele für Personalpronomen, Relativ-, Demonstrativ- und Indefinitpronomen im Kapitel B.7 des Anhangs (Glossar grammatikalischer Begriffe).
4. *Sonderfall:* Mathematische Ausdrücke wie Größen und Einheiten werden als Begriffe gemäß den zuvor beschriebenen Konventionen markiert.

Bsp. 1: (*fiktiv gewählt*) “N eins ist größer als N zwei” (→N eins, →N zwei)

Bsp. 2: (*fiktiv gewählt*) “N eins mal Sinus Alpha ist gleich N zwei mal Sinus Beta” (→N eins, →N zwei, → Sinus Alpha, → Sinus Beta) ... hier werden Sinus Alpha sowie Sinus Beta als jeweils ein Begriff gekennzeichnet (und nicht Sinus und Alpha als jeweils ein Begriff), weil sie als jeweils ein Faktor eine Einheit ergeben.

Bsp. 3: (*Gegenbeispiel, fiktiv gewählt*) In “Der Sinus des Einfallswinkels ist größer als der Sinus des Ausfallswinkels” werden →Einfallswinkel, →Sinus (1), →Ausfallswinkel, →Sinus (2) genau dann als einzelne Begriffe gekennzeichnet, also zwischen Winkel und Sinus unterschieden, wenn etwa Einfalls- bzw. Ausfallswinkel in der weiteren Erklärung auch ohne den Sinus eine Rolle spielen. Ist das nicht der Fall, kann z.B. “Sinus des Einfallswinkels” als ein zusammengehöriger Begriff übernommen werden.

BEISPIEL

“Sehen wir uns ein Lichtbündel an, das von einem Gegenstand unter Wasser, z.B. von einer Münze, ausgeht und in unser Auge gelangt: Wenn das Lichtbündel schräg auf die Wasser-oberfläche fällt, wird es an der Grenzfläche Wasser-Luft gebrochen. Unser Gehirn geht aber aufgrund der Erfahrung davon aus, daß sich Licht geradlinig ausbreitet. Es verlegt deshalb den Ausgangspunkt des Lichtbündels an eine andere Stelle; wir nehmen den Gegenstandspunkt dort wahr, wo sich die rückwärts verlängerten Randstrahlen des gebrochenen Lichtbündels schneiden. Wir sehen ein virtuelles Bild des Gegenstandes, der Gegenstand ist scheinbar angehoben.”

B.2.3 Dritter Teilschritt: Nomen und Pronomen auflisten

REGEL

Alle im Text markierten Nomen und Pronomen werden (etwa mit Hilfe eines Tabellenprogramms) in ihrer Grundform (Nominativ) in eine Liste eingetragen.

SONDERFÄLLE, AUSNAHMEN UND HINWEISE

1. *Hinweis:* Mehrzahlkonstruktionen beschreiben mehrere Entitäten durch ein Nomen oder Pronomen. Wird zwischen diesen Entitäten in der Erklärung unterschieden, sind diese als einzelne Nomen zu kennzeichnen.

Bsp.: (*Beispiel ist fiktiv gewählt*) “Der Beobachter sieht zwei Aquarien, von denen im linken ...”
(→Beobachter, →Aquarium (links), →Aquarium (rechts)),

2. *Sonderfall:* Wird auf die in einer Mehrzahlkonstruktion auftauchenden (Teil-)Begriffe nicht weiter eingegangen, kann der Pluralbegriff in die Liste übernommen werden.

Bsp.: “Die seitlichen Grenzflächen des Aquariums werden nicht betrachtet” →seitliche Grenzflächen (statt →seitliche Grenzfläche (links) und →seitliche Grenzfläche (rechts))

BEISPIEL

NOMEN, PRONOMEN	
Lichtbündel	Erfahrung
Gegenstand	Licht
Wasser	es
Münze	Ausgangspunkt
unser	Lichtbündel
Auge	andere Stelle
Lichtbündel	wir
Wasseroberfläche	Gegenstandspunkt
wir	rückwärts verlängerte Randstrahlen
Grenzfläche	gebrochenes Lichtbündel
Wasser	wir
Luft	virtuelles Bild
unser	Gegenstand
Gehirn	Gegenstand

B.2.4 Vierter Teilschritt: Ersetzen von Pronomen durch Nomen

REGEL

In diesem Schritt werden alle Pronomen, die sich auf ein Nomen beziehen, durch dieses Nomen ersetzt.

SONDERFÄLLE, AUSNAHMEN UND HINWEISE

1. *Sonderfall*: Taucht ein Pronomen auf, dass sich auf ein Nomen bezieht, welches noch nicht im Text zu finden ist, so soll dieses Nomen sinngemäß und fachlich nachvollziehbar eingeführt werden.

Bsp.: "wir" → Beobachter

2. *Ausnahme*: Pronomen (v.A. Demonstrativpronomen und Relativpronomen), die sich auf Beziehungen oder auf ganze Sachverhalte beziehen, werden nicht ersetzt. Sie werden in einem späteren Schritt zu Hilfe genommen, um beispielsweise Beziehungen höherer Ordnung zu kennzeichnen.

BEISPIEL

In der nachfolgenden Beispieltabelle sind die ersetzenden Wörter kursiv aufgelistet.

NOMEN	
Lichtbündel, (das)	Erfahrung
Gegenstand	Licht
Wasser	<i>Licht</i>
Münze	Ausgangspunkt
<i>Beobachter</i>	Lichtbündel
Auge	andere Stelle
Lichtbündel	<i>Beobachter</i>
Wasseroberfläche	Gegenstandspunkt
<i>Beobachter</i>	rückwärts verlängerte Randstrahlen
Grenzfläche	gebrochenes Lichtbündel
Wasser	<i>Beobachter</i>
Luft	virtuelles Bild
<i>Beobachter</i>	Gegenstand
Gehirn	Gegenstand

B.2.5 Fünfter Teilschritt: Transformation von Nomen zu Elementen

REGEL

Alle identischen Wörter der Liste, die im Text zweifelsfrei die gleiche Bedeutung tragen, können bis auf einen Vertreter gestrichen werden. Verschiedene Wörter, die aber zweifelsfrei synonym verwendet werden, können ebenfalls gestrichen werden. Dabei soll ein Nomen als stellvertretendes Konzept in der Liste bleiben und alle synonym verwendeten Wörter in eine zusätzliche Spalte hinter dem Stellvertreter eingetragen werden. Leere Zeilen werden eliminiert. Die übrig gebliebenen Zeilen werden nummeriert. Die so entstandene Tabelle ist eine Auflistung der Elemente der zukünftigen Concept Maps.

Die Nummern (IDs) der Elemente werden nun im ursprünglichen (markierten) Text an die jeweiligen Nomen und Pronomen geschrieben.

SONDERFÄLLE, AUSNAHMEN UND HINWEISE

1. *Ausnahme*: Nomen, die zwar dasselbe Objekt bezeichnen, aber konzeptionell unterschiedlich verwendet werden, sollen nicht zu einem Element zusammengefasst werden.

Bsp.: "Stoff" ≠ "Medium" → Als "Stoffe" werden Substanzen umgangssprachlich identifiziert. Ein "Medium" ist dagegen im physikalischen Gebrauch mit speziellen Eigenschaften belegt.

2. *Hinweis*: Nomen, die in einem Text synonym verwendet und zu einem Element zusammengefasst werden, können in einem anderen Text unterschiedliche Bedeutungen tragen und dort folglich nicht zu dem gleichen Element zusammengefasst werden. Jeder Text muss gesondert auf Synonyme geprüft werden.
3. *Ausnahme*: Homonyme, also gleiche Wörter unterschiedlicher Bedeutung, sollen nicht eliminiert werden, wie z.B. das Wort "Lichtstrahl" verschiedene Objekte in einer Erklärung bezeichnen kann. Taucht ein Wort in der Liste mehrmals auf, so soll es durch Nummerierung oder nähere Bezeichnung gekennzeichnet werden.
4. *Hinweis*: Homonyme Elemente sollen nicht als übergeordnete Begriffe, sondern als konkrete Entitäten verstanden werden. Wird z.B. in einer Erklärung von einer Münze in einem Becken ohne Wasser und einer Münze im Becken mit Wasser gesprochen, so sind in der Tabelle zwei Münzen und zwei Becken aufzulisten. Gleiches gilt beispielsweise für Licht von einem Objekt A und Licht von einem Objekt B.

BEISPIEL

ID	ELEMENT	SYNONYME
1	Lichtbündel	
2	Münze	Gegenstand
3	Wasser	
4	Beobachter	Auge, Gehirn
5	Wasseroberfläche	
6	Grenzfläche	
7	Luft	
8	Erfahrung	
9	Licht	
10	Ausgangspunkt	
11	andere Stelle	
12	Gegenstandspunkt	
13	rückwärts verlängerte Randstrahlen	
14	gebrochenes Lichtbündel	
15	virtuelles Bild	

Sehen wir uns ein Lichtbündel (1) an, das (1) von einem Gegenstand (2) unter Wasser (3), z.B. von einer Münze (2), ausgeht und in unser (4) Auge (4) gelangt: Wenn das Lichtbündel (1) schräg auf die Wasseroberfläche (5) fällt, wird es (1) an der Grenzfläche (6) Wasser (3)-Luft (7) gebrochen. Unser (4) Gehirn (4) geht aber aufgrund der Erfahrung (8) davon aus, daß sich Licht (9) geradlinig ausbreitet. Es (4) verlegt deshalb den Ausgangspunkt (10) des Lichtbündels (1) an eine andere Stelle (11); wir (4) nehmen den Gegenstandspunkt (12) dort wahr, wo sich die rückwärts verlängerten Randstrahlen (13) des gebrochenen Lichtbündels (14) schneiden. Wir (4) sehen ein virtuelles Bild (15) des Gegenstandes (2), der Gegenstand (2) ist scheinbar angehoben.'

B.3 ZWEITER SCHRITT: KATEGORISIERUNG DER ELEMENTE

B.3.1 Sechster Teilschritt: Einordnen der Elemente in Kategorien

Das Einordnen der Elemente in die Kategorien des modellorientierten Rahmenkonzepts erfolgt nach zwei Kriterien, die jeweils eine dichotome Entscheidung verlangen. Somit werden insgesamt vier Kategorien (2x2) erzeugt. Eines der Kriterien unterscheidet Elemente nach ihrer Zugehörigkeit zum Phänomen oder zur Theorie. Das andere Kriterium unterscheidet Elemente nach ihrer Relevanz für ein Modell zur Erklärung:

1. Wurde das bezeichnete Element begrifflich im Phänomen erkannt bzw. aus der unmittelbaren (Alltags-)Erfahrung abgeleitet oder wurde es aus Rahmen des Physiklernens erinnert?

‘direkt erkannt oder aus unmittelbarer Erfahrung abgeleitet’ $\rightarrow Ph$ (Phänomenbereich).

‘gelernt’ $\rightarrow Th$ (Theoriebereich).

2. Ist das bezeichnete Element für ein Modell im Rahmen der vorliegenden Erklärung des Phänomens relevant?

‘ja’ $\rightarrow M$

‘nein’ $\rightarrow o$

Für die Entscheidung der Zuordnung eines Elements zum Phänomen- oder Theoriebereichs kann also überprüft werden, ob sich das Bezugsobjekt, das durch das Element bezeichnet wird, prinzipiell erkennen lässt. Ist das nicht der Fall, so handelt es sich nicht um ein Element des Phänomens. Wenn sich das Bezugsobjekt dagegen prinzipiell erkennen lässt, kann eine Unterscheidung des Elements dahingehend zu Hilfe genommen werden, ob es vorwiegend in fachlichen Diskursen (dann: Theorie) oder vorwiegend umgangssprachlich (dann: Phänomen) verwendet wird.

Es entstehen somit vier Kategorien: *Ph-o* nichtrelevantes Element des Phänomens, *Ph-M* relevantes Element des Phänomens, *Th-M* relevantes Element der Theorie und *Th-o* nichtrelevantes Element der Theorie. Diese nominalen Kategoriencodes sind in eine Spalte der Tabelle einzutragen. Alternativ zu den Bezeichnungen *Ph-o* usw. können für die gleiche Reihenfolge der Kategorien auch die Bezeichnungen 1, 2, 3, 4 verwendet werden. Diese Bezeichnung durch Ziffern wird in den folgenden Tabellen verwendet.

Bei Begriffen, die sowohl dem Phänomen- als auch dem Theoriebereich zugeordnet werden können, soll kontextabhängig entschieden werden, wie sie kodiert werden: ein “Winkel” zwischen zwei Objekten des Phänomenbereichs (z.B. zwischen der Blickrichtung und der Wasseroberfläche) ist selbst ein Element des Phänomens. Dagegen ist ein Winkel zwischen zwei theoretischen Elementen oder je einem Element der Theorie und des Phänomens als ein theoretisches Element zu kodieren. Dementsprechend ist die Einordnung von gleichen Begriffen in unterschiedliche Kategorien prinzipiell möglich. Allerdings wird die Einordnung in eine Kategorie durch den Gebrauch festgelegt.

Die Kategorien sind in Tabelle B.3 beschrieben und enthalten Kriterien für die Einordnung sowie Beispiele aus den eigenen Vorarbeiten. Die Kodierregeln wurden anhand von Textmaterial entwickelt, welches

ausdrücklich nicht aus der Hauptstudie stammt. Somit soll eine mögliche Fehleinschätzung der Güte des Instruments, insbesondere der Beurteilerübereinstimmung, vermieden werden. Die Bemerkungen in den Klammern der Spalte 'Kriterien' wurden nach der Überprüfung der Beurteilerübereinstimmung hinzugefügt.

SONDERFÄLLE, AUSNAHMEN UND HINWEISE

1. *Hinweis:* Insbesondere ist auf die unterschiedliche Zugehörigkeit zu Kategorien von verwandten Elementen zu achten, wenn diese sich in ihrer konzeptionellen und sprachlichen Verwendung unterscheiden. Z.B. ist "Wasseroberfläche" ein Element des Phänomens (Kategorie 2), die "Grenzfläche" oder der "Übergang" (zwischen zwei Medien) sind jedoch Begriffe für theoretische Elemente (3), gleiches gilt für "scheinbarer Ort" (2) und "(virtuelles) Bild" (3), "Laserstrahl" (2) und "Lichtstrahl" (3) oder "Stoff" (2) und "Medium" (3).
2. *Hinweis:* Wird ein Element als theoretisch kodiert, dann wird i.d.R. ein zweites Element, das im Besitz des ersten ist, ebenfalls als theoretisch kodiert werden.
 Bsp.: "Weg des Lichts", Licht (3) → Weg (3); "Ausgangspunkt der Strahlen", Strahlen (3) → Ausgangspunkt (3)
3. Punkte eines Objekts, beispielsweise eines Bleistifts werden mit 2 kodiert, da die Zergliederung von Objekten in *Objekt*- und deren *Bild*-Punkte aus dem Kontext der Optik stammen, während Punkte, an denen beispielsweise der Laserstrahl (nicht: Lichtstrahl!) durch die Wasseroberfläche tritt, mit 3 kodiert werden, da diese umgangssprachlich wie z.B. Einstichpunkte verwendet werden.
4. Das Element "Ort" (oder: "Lage", "Stelle", "Position") von sichtbaren Objekten wird mit 2 kodiert, da sie im Phänomen erkannt werden können. Orte von theoretischen Entitäten oder Ereignissen wie z.B. der Schnittpunkt eines Lichtstrahls (nicht: eines Laserstrahls!) werden dagegen mit 3 kodiert.
5. Das Element "Stoff" wird mit 2 kodiert, weil Materialien auch umgangssprachlich als Stoffe bezeichnet werden. Das Element "Medium" wird dagegen als 3 kodiert, da diese Bezeichnung physikspezifisch ist. Ebenso werden Begriffe wie "Stoffdichte" oder "Stoffeigenschaften" mit 3 (oder 4) kodiert, da sie erst im Rahmen naturwissenschaftlicher Lehr-Lern-Prozesse etabliert werden.
6. Das Element "Oberfläche" wird mit 2 kodiert, weil es zwar sowohl alltäglich als auch im physikspezifischen Kontext verwendet wird, sich jedoch nicht erst in naturwissenschaftlichen Lehr-Lern-Prozessen etabliert und dort auch keine eigene Bedeutung erlangt. Dahingegen wird das Element "Grenzfläche" als 3 kodiert, weil es nicht alltäglich benutzt wird und spezifisch für die Verwendung in der Optik Verwendung findet.
7. Elemente, die aus verwandten Konzepten im Rahmen der Optik stammen, wie z.B. aus dem Wellen- oder Teilchenkonzept, werden zur Einordnung der Brechung in Erklärungen des abgelenkten Laserstrahls als relevant angesehen und daher mit 3 kodiert, in den Erklärungen zur gehoben erscheinenden Münze oder dem geknickt erscheinenden Bleistift dagegen mit 4, weil sie dort nicht mehr relevant sind.

BEISPIEL

ID	ELEMENT	SYNONYME	CODE
1	Lichtbündel		3
2	Münze	Gegenstand	2
3	Wasser		2
4	Beobachter	Auge, Gehirn	2
5	Wasseroberfläche		2
6	Grenzfläche		3
7	Luft		2
8	Erfahrung		2
9	Licht		3
10	Ausgangspunkt		3
11	andere Stelle		3
12	Gegenstandspunkt		2
13	rückwärts verlängerte Randstrahlen		3
14	gebrochenes Lichtbündel		3
15	virtuelles Bild		2

B.4 DRITTER SCHRITT: IDENTIFIKATION DER BEZIEHUNGEN

Eine Beziehung setzt mindestens ein Element als Quelle (*Source*) und ein Element als Ziel (*Target*) in Verbindung miteinander oder sie setzt selbst eine Beziehung mit einem Element oder mit einer weiteren Beziehung in Verbindung miteinander.

Es kann eine oder mehrere Quelle(n) mit einem oder mehreren Ziel(en) durch eine Beziehung in Verbindung gesetzt werden, oder es kann eine Quelle durch mehrere Beziehungen mit mehreren Zielen (bzw. umgekehrt) in Verbindung gesetzt werden (siehe Tabelle B.1 und Abbildung B.3). Dabei können Quelle und Ziel identisch sein (Schleifen), z.B. bei reflexiven Beziehungen.

In einer Tabelle sind für jede Beziehung eine Beziehungs-ID, die Quellen-ID, die Ziel-ID sowie die Bezeichnung (Label) der Beziehung aufzulisten. Es ist hilfreich, aber nicht notwendig, die durch die Beziehung entstehenden Propositionen in einer weiteren Spalte hinzuzufügen.

Tabelle B.1: Beispiele für verschiedene Typen von Beziehungen

TYP	BEISPIELSATZ	BEISPIEL IN ABBILDUNG B.3
1 Element (Quelle) - 1 Beziehung - 1 Element (Ziel)	Von einer Münze geht Licht aus.	links
1 Element (Quelle) - x Beziehungen - x Elemente (Ziele)	Von einer Münze geht Licht aus, das ins Auge gelangt.	Mitte links
1 Element (Quelle) - 1 Beziehung - x Elemente (Ziele)	Die Grenzfläche (ist) zwischen Luft und Wasser.	Mitte rechts
1 Element (Quelle und Ziel) - 1 Beziehung	Die Münze erscheint gehoben.	rechts

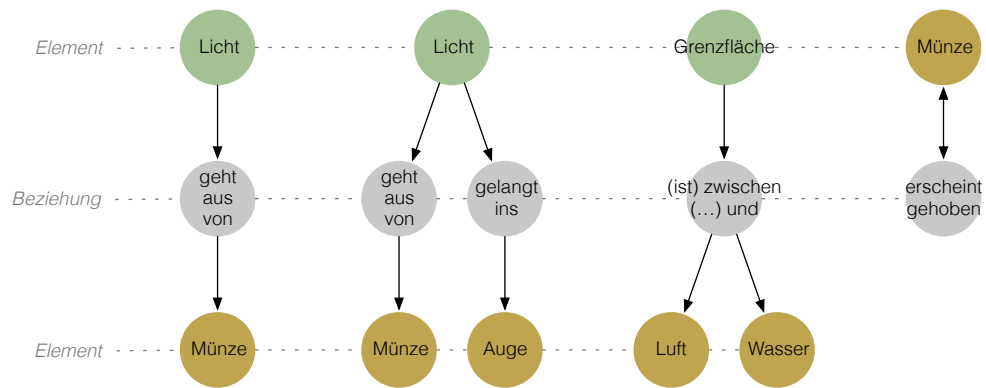


Abbildung B.3: Beispiele für verschiedene Konstellationen von Elementen und Beziehungen in kCMs

B.4.1 Siebenter Teilschritt: besitzanzeigende Beziehungen zwischen Elementen identifizieren

REGEL

Besitzanzeigende Beziehungen sind i.d.R. durch Genitivkonstruktionen im Satz gekennzeichnet. Diese Beziehungen soll mit "hat" (bzw. "haben" im Plural) als Label versehen werden

SONDERFÄLLE, AUSNAHMEN UND HINWEISE

1. *Ausnahme*: siehe oben, Abschnitt "Nomen und Pronomen markieren", wenn beide Teile der besitzanzeigenden Beziehung synonym verwendet werden, kann auf die Darstellung der Beziehung verzichtet werden.
2. *Hinweis*: Besitzanzeigende Beziehungen legen die Bedeutung der beteiligten Elemente fest.
Bsp.: "Ausgangspunkt des Lichtbündels" → Damit ist der Ausgangspunkt spezifiziert: es ist damit nur dieser Ausgangspunkt und kein weiterer gemeint.
3. *Hinweis*: Steht ein Element in mehreren besitzanzeigenden Beziehungen, so werden diese einzeln aufgelistet (siehe Tabelle B.1 und Abbildung B.3).

BEISPIEL

ID	LABEL	SOURCE	TARGET	PROPOSITION
e1	hat	4	8	<i>Beobachter hat Erfahrung</i>
e2	hat	1	10	<i>Lichtbündel hat Ausgangspunkt</i>
e3	hat	14	13	<i>gebrochenes Lichtbündel hat rückwärts verlängerte Randstrahlen</i>
e4	hat	2	15	<i>Münze hat virtuelles Bild</i>

B.4.2 Achter Teilschritt: weitere Beziehungen zwischen Elementen identifizieren

REGEL

Jedes Element, dass im Text gekennzeichnet und nummeriert ist, wird einzeln geprüft, in welchen Beziehungen es zu anderen Elementen (bzw. zu sich selbst) steht. Beziehungen können sich über mehrere Sätze oder Teilsätze strecken. Die jeweiligen Beziehungen sind wieder in einer Tabelle mit einer Beziehungs-ID, der Quellen-ID, der Ziel-ID sowie der Bezeichnung (Label) der Beziehung aufzulisten.

SONDERFÄLLE, AUSNAHMEN UND HINWEISE

1. *Hinweis:* Fehlen zur Formulierung einer Proposition Satzteile, weil beispielsweise der betroffene Satzteil im Ausgangstext eine elliptische Konstruktion (Auslassung) ist, so sollen diese unter Kennzeichnung durch eine Klammer sinngemäß eingefügt werden.
2. *Ausnahme:* Werden zwei Elemente mehrmals durch ein gleich lautendes Label zweifelsfrei bedeutungsgleich in Beziehung zueinander gesetzt, so soll diese Beziehung nur einmal aufgelistet werden.

BEISPIEL

ID	LABEL	SOURCE	TARGET	PROPOSITION
...
e5	geht aus von	1	2	<i>Lichtbündel geht aus von Münze</i>
e6	(ist) unter	2	3	<i>Münze (ist) unter Wasser</i>
e7	gelangt in / zu	1	4	<i>Lichtbündel gelangt zu Beobachter</i>
e8	fällt schräg auf	1	5	<i>Lichtbündel fällt schräg auf Wasseroberfläche</i>
e9	wird gebrochen an	1	6	<i>Lichtbündel wird gebrochen an Grenzfläche</i>
e10	(ist zwischen ... und)	6	3	<i>Grenzfläche (ist zwischen) Wasser (und) ...</i>
	(ist zwischen ... und)	6	7	<i>Grenzfläche (ist zwischen) ... (und) Luft</i>
e11	breitet sich geradlinig aus	9	9	<i>Licht breitet sich geradlinig aus</i>
e12	verlegt	4	10	<i>Beobachter verlegt Ausgangspunkt</i>
e13	nimmt wahr	4	12	<i>Beobachter nimmt wahr Gegenstandspunkt</i>
e14	schneiden sich	13	13	<i>rückwärts verlängerte Randstrahlen schneiden sich</i>
e15	sieht	4	15	<i>Beobachter sieht virtuelles Bild</i>
e16	ist scheinbar angehoben	2	2	<i>Gegenstand ist scheinbar angehoben</i>

B.4.3 Neunter Teilschritt: Beziehungen zu anderen Beziehungen identifizieren

REGEL

Eine Beziehung kann ihrerseits wiederum zu einer anderen Beziehung oder zu einem Element in Beziehung gesetzt werden, z.B. kausal, räumlich oder zeitlich ("Meta-Beziehung"). Es soll eine Kennzeichnung durch eine ID (m1, m2, m3, ...) erfolgen. Entweder Quelle oder Ziel oder beides ist eine Beziehung oder Meta-Beziehung. In die Spalten Source bzw. Target ist die ID der jeweiligen Quell- oder Zielbeziehung einzusetzen. Meta-Beziehungen bilden zusammen mit Quelle und Ziel ebenfalls eine auswertbare Proposition. Auch hier kann die entstehende Proposition in eine zusätzliche Spalte eingefügt werden.

SONDERFÄLLE, AUSNAHMEN UND HINWEISE

1. *Hinweis:* Folgende Wörter sind Indikatoren für eine Meta-Beziehung: wenn (dann), nachdem, bevor, aufgrund, deshalb, daher, dort wo, dieses, ...

2. *Hinweis:* (analog zum achten Schritt) Fehlen zur Formulierung einer Proposition Satzteile, weil beispielsweise der betroffene Satzteil im Ausgangstext eine elliptische Konstruktion (Auslassung) ist, so sollen diese unter Kennzeichnung durch eine Klammer sinngemäß eingefügt werden.
3. *Ausnahme:* (analog zum achten Schritt) Werden zwei Elemente bzw. Beziehungen mehrmals durch ein gleich lautendes Label zweifelsfrei bedeutungsgleich in Beziehung zueinander gesetzt, so soll diese Beziehung nur einmal aufgelistet werden.

BEISPIEL

ID	LABEL	SOURCE	TARGET	PROPOSITION
m1	(wenn) dann	e8	e9	wenn 'Lichtbündel fällt schräg auf Wasseroberfläche' dann 'Lichtbündel wird gebrochen an Grenzfläche'
m2	geht aus von	4	e11	'Beobachter' geht aus von 'Licht breitet sich geradlinig aus'
m3	aufgrund	m2	8	"Beobachter" geht aus von 'Licht breitet sich geradlinig aus' aufgrund 'Erfahrung'
m4	an	e12	11	'Beobachter verlegt Ausgangspunkt' an 'andere Stelle'
m5	deshalb	m3	m4	"Beobachter" geht aus von 'Licht breitet sich geradlinig aus' aufgrund 'Erfahrung' deshalb "Beobachter verlegt Ausgangspunkt' an 'andere Stelle"
m6	dort wo	e13	e14	'Beobachter nimmt wahr Gegenstandspunkt' dort wo 'rückwärts verlängerte Randstrahlen schneiden sich'

B.5 VIERTER SCHRITT: FACHLICHE BEWERTUNG DER AUSSAGEN

B.5.1 Zehnter Teilschritt: Propositionen aus fachlicher Sicht bewerten

REGEL

Jede Proposition soll dahingehend geprüft werden, ob sie aus fachlicher Sicht korrekt ("i") oder nicht korrekt ("o") ist. Eine Übersicht über Regeln, die eine Proposition als fachlich nicht korrekt bewerten, ist in Tabelle B.2 dargestellt.

Tabelle B.2: Regeln zur Bewertung von Propositionen als fachlich inkorrekt

REGEL	PROPOSITION			BEMERKUNG
f1 - stark vereinfachte Aussagen	Münze scheint an anderer Ort	durch	Brechung	Die Brechung ist eine Beschreibung des Verhaltens von Licht an Grenzflächen im Strahlen- (und Wellen-)Konzept und ist keine hinreichende Bedingung für das Auftreten des genannten Phänomens. Notwendig ist hierbei noch das Vorhandensein eines Beobachters.
	Luft	macht, dass	Beobachter sieht Münze nur halb	Das Vorhandensein von Luft ist keine hinreichende Bedingung dafür, dass die Münze nicht vollständig sichtbar ist.
f2 - Verwendung eines ungeeigneten (physikalischen) Konzepts	Lichtstrahlen	werden gebrochen an	Wasseratomen	Das Verhalten von Lichtstrahlen wird hier nicht durch Teilchen beeinflusst. Wenn Lichtstrahlen an Atomen gebrochen würden, dann müssten sie im gesamten Medium (also ständig) gebrochen werden. Eine Bildentstehung wäre damit unmöglich (somit auch f3).
f3 - Verstoß gg. fachlich etabliertes Prinzip / fachl. etabl. Zusammenhang	Licht	wird gebrochen im	Wasser / dichteres Medium	Licht wird nicht in einem Medium gebrochen, sondern an einer Grenzfläche.
	Licht	wird gebrochen hin zu	Lot (bei Übergang von Wasser zu Luft)	Licht wird bei diesem Übergang vom Lot weg gebrochen.
f4 - nicht haltbare Formulierung eines physikalischen Zusammenhangs	Lichtstrahlen	bewegen sich hin zum	Lot	Lichtstrahlen verändern ihren Ort bei fester Konstellation von Ausgangspunkt und Empfänger zeitlich nicht.
	Licht	wird getroffen in	anderer Winkel	Das Licht wird im Konzept der Brechung nicht durch etwas getroffen, es trifft auf etwas (beispielsweise auf eine Grenzfläche)
f5 - Wahrnehmung hypothetischer Entitäten	Beobachter	sieht	Lichtstrahl	Lichtstrahlen sind hypothetische, mathematische Entitäten und als solche der Wahrnehmung nicht zugänglich, ebenso wenig wie Wellen oder Teilchen.
f6 - grobe Fehlinterpretation von Wahrnehmungen	Beobachter	sieht	Stift ist nach unten geknickt	Die Aussage ist dann eine grobe Fehlinterpretation der Wahrnehmung, wenn beispielsweise offensichtlich aus der Wahrnehmung das Gegenteil interpretierbar ist

SONDERFÄLLE, AUSNAHMEN UND HINWEISE

1. Einige Propositionen sind einfacher zu bewerten, wenn die Bemerkungen an den entsprechenden Elementen berücksichtigt werden, die ggf. Ziel oder Quelle der Beziehung in der Proposition bilden
2. Einige Propositionen werden erst auswertbar, wenn übergeordnete Propositionen (Metabeziehungen) berücksichtigt werden, die diese Ausgangsproposition beinhalten. Fiktives Beispiel: "Licht wird gebrochen hin zu Lot" kann sowohl fachlich korrekt als auch fachlich inkorrekt sein und ist erst dann zu bewerten, wenn eine entsprechende Bedingung genannt wird, z.B. "... bei Übergang von dünn zu dicht".

Im Zweifelsfall kann eine Proposition zunächst unbewertet bleiben und nachträglich bewertet werden, wenn ihre Bedeutung durch eine übergeordnete Proposition ersichtlich wird oder dadurch sogar nachträglich anders bewertet werden.

3. Propositionen im Konjunktiv (z.B.: “Münze würde erscheinen an gleicher Stelle”) sind als fachlich korrekt zu bewerten, wenn es überhaupt Bedingungen gibt, die im Kontext des gezeigten Phänomens bzw. der genutzten Theorie ein Eintreten der Aussage ermöglichen.
4. Hinweis zur Identifizierung der Elemente: Elemente werden durch die Beziehungen, deren Quelle oder Ziel sie sind, spezifiziert. Bsp.: “Münze (links) hat Oberfläche”. Dadurch ist das Element “Oberfläche” als Oberfläche der Münze (links) eindeutig bestimmt. Ausnahmen bilden allgemeine Benennungen, beispielsweise “Lichtstrahlen (allg.)”

BEISPIEL

ID	LABEL	S	T	PROPOSITION	i/o
e1	hat	4	8	<i>Beobachter hat Erfahrung</i>	1
e2	hat	1	10	<i>Lichtbündel hat Ausgangspunkt</i>	1
e3	hat	14	13	<i>gebrochenes Lichtbündel hat rückwärts verlängerte Randstrahlen</i>	1
e4	hat	2	15	<i>Münze hat virtuelles Bild</i>	1
e5	geht aus von	1	2	<i>Lichtbündel geht aus von Münze</i>	1
e6	(ist) unter	2	3	<i>Münze (ist) unter Wasser</i>	1
e7	gelangt in / zu	1	4	<i>Lichtbündel gelangt zu Beobachter</i>	
e8	fällt schräg auf	1	5	<i>Lichtbündel fällt schräg auf Wasseroberfläche</i>	1
e9	wird gebrochen an	1	6	<i>Lichtbündel wird gebrochen an Grenzfläche</i>	
e10	(ist zwischen ... und)	6	3	<i>Grenzfläche (ist zwischen) Wasser (und) ...</i>	1
	(ist zwischen ... und)	6	7	<i>Grenzfläche (ist zwischen) ... (und) Luft</i>	1
e11	breitet sich geradlinig aus	9	9	<i>Licht breitet sich geradlinig aus</i>	1
e12	verlegt	4	10	<i>Beobachter verlegt Ausgangspunkt</i>	1
e13	nimmt wahr	4	12	<i>Beobachter nimmt wahr Gegenstandspunkt</i>	1
e14	schneiden sich	13	13	<i>rückwärts verlängerte Randstrahlen schneiden sich</i>	1
e15	sieht	4	15	<i>Beobachter sieht virtuelles Bild</i>	1
e16	ist scheinbar angehoben	2	2	<i>Gegenstand ist scheinbar angehoben</i>	1
m1	(wenn) dann	e8	e9	<i>wenn ‘Lichtbündel fällt schräg auf Wasseroberfläche’ dann ‘Lichtbündel wird gebrochen an Grenzfläche’</i>	1
m2	geht aus von	4	e11	<i>‘Beobachter’ geht aus von ‘Licht breitet sich geradlinig aus’</i>	1
m3	aufgrund	m2	8	<i>“Beobachter” geht aus von ‘Licht breitet sich geradlinig aus’ aufgrund ‘Erfahrung’</i>	1
m4	an	e12	11	<i>‘Beobachter verlegt Ausgangspunkt’ an ‘andere Stelle’</i>	1
m5	deshalb	m3	m4	<i>“Beobachter” geht aus von ‘Licht breitet sich geradlinig aus’ aufgrund ‘Erfahrung’ deshalb “Beobachter verlegt Ausgangspunkt” an ‘andere Stelle’</i>	1
m6	dort wo	e13	e14	<i>‘Beobachter nimmt wahr Gegenstandspunkt’ dort wo ‘rückwärts verlängerte Randstrahlen schneiden sich’</i>	1

B.6 KODIERREGELN

Tabelle B.3: Kodierregeln für die Kategorienzuordnung

CODE / KATEGORIE	KRITERIEN	BEISPIELE
1 / <i>Ph-o</i> : nicht relevantes Element des Phänomens	Das bezeichnete Element wurde begrifflich im Phänomen erkannt bzw. aus der unmittelbaren, alltäglichen Erfahrung abgeleitet und wird so auch umgangssprachlich verwendet, spielt aber für ein Modell zur Erklärung des Phänomens keine Rolle.	Bild (als Foto), Foto, Helligkeit, Lampe, Papier, Schatten, Staub, Tisch, Illusion, Täuschung
2 / <i>Ph-M</i> : relevantes Element des Phänomens	Das bezeichnete Element wurde begrifflich im Phänomen erkannt bzw. aus der unmittelbaren, alltäglichen Erfahrung abgeleitet und wird so auch umgangssprachlich verwendet und spielt für ein Modell zur Erklärung des Phänomens eine Rolle.	Anteil (eines sichtbaren Objekts), Auge, Aquarium, Becken, Beobachter, Blickrichtung, Blickwinkel, Boden, Box, Erfahrung, Wahrnehmung, Sehgewohnheit, Gegenstand, Gehirn, Innere (des Behälters), Knick (eines sichtbaren Objekts), (messbare) Lage, Laserstrahl, Luft, Münze, Oberfläche, Objekt, (messbare) Position, (erkennbarer) Punkt, (Glas-) Scheibe, Stab, (messbare, tastbare) Stelle, Teil (eines sichtbaren Objekts), Wasser, Wasseroberfläche, Winkel (zwischen sichtbaren Objekten)
3 / <i>Th-M</i> : relevantes Element der Theorie	Das bezeichnete Element wurde aus Rahmen des Physiklernens erinnert (und wird vorwiegend in fachsprachlichen Diskursen verwendet). Es ist relevant für ein Modell zur Erklärung.	Alpha, (optische) Achse, Ausbreitungsrichtung, Ausfallsrichtung, Ausfallswinkel, Ausgangspunkt (eines Lichtstrahls), Beta, (virtuelles oder reales) Bild, Brechung, Brechungsgesetz, -index, -winkel, Einfallstrahlung, -winkel, Flächennormale, Fußpunkt, Grenzfläche, Grenzsicht, Knick (eines Strahls), Lichtbündel, -strahl, -welle (wenn verb. mit Ausbreitungsrichtg. im Kontext der Brechung), Lot, Medium, (Luft-/Wasser-) Partikel (bzgl. Streuung zum Beobachter), n , (Medien-)Übergang, Normale, Randstrahl, Reflexion (zum Beob.), Richtungsänderung, Schnittpunkt (von Strahlen), Snellius, Stelle (z.B. des Schnittpunkt v. Strahlen), Strahl, Streuung (z.B. zum Beobachter), Verlängerung (eines Strahls), Wellenfront (verbunden mit der Ausbreitungsrichtung im Kontext der Brechung), Winkel (zwischen nicht sichtbaren Objekten)
4 / <i>Th-o</i> : nicht relevantes Element der Theorie	Das bezeichnete Element wurde aus Rahmen des Physiklernens erinnert (und wird vorwiegend in fachsprachlichen Diskursen verwendet) und ist nicht relevant für ein Modell zur Erklärung.	Absorption, Atom, Beugung, Dispersion, Lichtquant, Lichtwelle (allgemein oder ohne Bezug zur Ausbreitungsrichtung im Kontext der Brechung), Reflexion (allgemein), Schwingung, Totalreflexion

B.7 GLOSSAR GRAMMATIKALISCHER BEGRIFFE

Die Bedeutungen der grammatikalischen Begriffe wurden der Online-Version des Duden im Zeitraum Mai 2016 - August 2016 entnommen (Duden2016).

Adjektiv, das - Wort, das ein Wesen oder Ding, ein Geschehen, eine Eigenschaft oder einen Umstand als mit einem bestimmten Merkmal, mit einer bestimmten Eigenschaft versehen kennzeichnet; Eigenschaftswort (Bsp. aus eigenen Vorarbeiten: optisch, real, sichtbar, virtuell)

Adverb, das - [unflektierbares] Wort, das ein im Satz genanntes Verb, ein Substantiv, ein Adjektiv oder ein anderes Adverb seinem Umstand nach näher bestimmt; Umstandswort (Bsp. aus eigenen Vorarbeiten: daher, deswegen, hier, hinten, dann)

Artikel, der - [der Bezeichnung des Genus von Substantiven dienende] Wortart mit identifizierender, individualisierender oder generalisierender Funktion; Geschlechtswort (Bsp. aus eigenen Vorarbeiten: die [Münze], ein [Lichtbündel])

Demonstrativpronomen, das - hinweisendes Fürwort

Genitiv, der - Kasus, in dem das Objekt bestimmter intransitiver Verben, bestimmte substantivische Attribute und bestimmte adverbiale Fügungen stehen; Wesfall, zweiter Fall

Indefinitpronomen, das - unbestimmtes \Pronomen (Bsp. ähnlich in eigenen Vorarbeiten: *alles* erscheint angehoben)

Nomen, das - \Substantiv

Personalpronomen, das - \Pronomen, das für die sprechende[n], angesprochene[n] Person[en] (...) oder für die Person[en] (...) oder Sache[n] steht, über die gesprochen wird

Pronomen, das - (deklinierbares) Wort, das ein [im Kontext vorkommendes] \Nomen vertritt oder ein Nomen, mit dem es zusammen auftritt, näher bestimmt; Fürwort (Bsp. aus eigenen Vorarbeiten: es, man, welcher, alles)

Relativpronomen, das - \Pronomen, das einen Nebensatz einleitet und ihn auf ein oder mehrere Substantive oder Pronomen des übergeordneten Satzes bezieht; bezügliches Fürwort

Substantiv, das - Wort, das ein Ding, ein Lebewesen, einen Begriff, einen Sachverhalt o.Ä. bezeichnet; Nomen, Haupt-, Ding-, Nennwort (z.B. Auge, Wasser, Innere)

synonym - mit einem anderen Wort oder einer Reihe von Wörtern von gleicher oder ähnlicher Bedeutung, sodass beide in einem bestimmten Zusammenhang austauschbar sind; sinnverwandt (Bsp. aus eigenen Vorarbeiten: 'gebrochener Strahl' und 'gebrochener Lichtstrahl')

Verb, das - flektierbares Wort, das eine Tätigkeit, ein Geschehen, einen Vorgang oder einen Zustand bezeichnet; Tätigkeits-, Zeitwort (Bsp. aus eigenen Vorarbeiten: gelangen, brechen/wird gebrochen, sehen)

C VORSTUDIE

Inhalt des Kapitels

C.1	Forschungsfragen	135
C.2	Methode	136
C.3	Ergebnisse	138
C.3.1	Güte der Identifikation und Kategorisierung von Elementen	138
C.3.2	Güte der Identifikation von Beziehungen	139
C.3.3	Güte der fachlichen Bewertung	140
C.3.4	Merkmale kategorienorientierter Concept Maps	141
C.4	Interpretation und Implikationen	144
C.4.1	Identifikation und Kategorisierung von Elementen	144
C.4.2	Identifikation von Beziehungen	145
C.4.3	Fachliche Bewertung	146
C.4.4	Zwei inhaltliche Argumente für die Validität des Verfahrens	146
C.4.5	Merkmale kategorienorientierter Concept Maps	147
C.5	Fazit der Vorstudie	149

Die Vorstudie hat das Ziel, die Güte für den gesamten im Manual beschriebenen Kodiervorgang einzuschätzen, mögliche Merkmale von kategorienorientierten Concept Maps zu benennen und zu interpretieren, sowie methodische Hinweise für eine Analyse der kCMs zu geben. Damit soll vor allem geprüft werden, ob und wie die Maps im Gegensatz zu anderen netzwerkartigen Darstellungen in der Lage sind, die Struktur in schriftsprachlichen Erklärungen vor einem modellorientierten Hintergrund zuverlässig und valide darzustellen und wie entsprechend potenziell wertvolle Aussagen aus dieser Struktur generiert werden können.

C.1 FORSCHUNGSFRAGEN

- VF-1 Wie kann die Güte des Verfahrens zum Erstellen kategorienorientierter Concept Maps beurteilt werden?
- VF-2 Welche voneinander unterscheidbaren Merkmale weisen kategorienorientierte Concept Maps auf und wie können diese Merkmale im Zusammenhang mit den zugrundeliegenden Erklärungen gedeutet werden?

C.2 METHODE

Im Rahmen der Vorstudie wurden Erklärungen aus unterschiedlichen Quellen (Lehrbuch, geschriebener Text, mündliche Erklärung) zu Phänomenen der scheinbaren optischen Hebung bzw. der optischen Brechung aufgenommen. Die Erklärungen erfolgten auf Basis von Fotos dieser Phänomene (Abb. C.1, C.2 und C.3), die im Rahmen einer Masterarbeit (Urbanowski, 2014) angefertigt wurden. Diese drei Fotos wurden ausgewählt, weil sie konzeptionell unterscheidbare Variationen innerhalb eines Phänomenkomplexes darstellen (vgl. Wiesner, 1994) und die kategorienorientierten Concept Maps daher ebenfalls voneinander unterscheidbar sein müssen. Die Abbildung C.1 kann in zweierlei Weise gedeutet werden. Eine Deutungsweise sieht in der Abbildung eine fotografische Umsetzung der häufig verwendeten Strahlenskizze der optischen Brechung mit Hilfe eines Laserstrahls. Dabei handelt es sich nicht um ein beobachtbares Phänomen im eigentlichen Sinn, sondern gemäß der oben getroffenen Festlegungen um die Visualisierung eines inner-theoretischen Konzepts, nämlich der Brechung von Lichtstrahlen. Zu erwarten ist daher eine sprachliche Beschreibung der Brechung im Strahlenkonzept. Gleichzeitig kann die Abbildung aber auch als Spezialfall des Phänomens der optischen Hebung betrachtet werden, bei dem der Einblickwinkel zum Lot einer Grenzfläche eines Mediums mit einem Objekt darin null Grad beträgt, da die vordere Aquariumswand orthogonal zur Blickrichtung bzw. zur optischen Achse des Fotoobjektivs angeordnet ist. Das (scheinbar gehobene) Objekt ist dann ein geknickter Laserstrahl. In beiden Fällen soll jedoch von dem Phänomen 'Brechung eines Laserstrahls' gesprochen werden. Die jeweilige Deutungsweise ist gegebenenfalls zu explizieren.

Die in Abbildung C.2 gezeigte *optische Hebung* ist in ähnlicher Form in vielen Physiklehrbüchern für Schule und Hochschule im Kontext der optischen Brechung bzw. Strahlenoptik anzutreffen. Gegenüber der Deutung des Phänomens 'Brechung' als Visualisierung der Strahlenskizze ist hier eine mentale Drehung der Anordnung notwendig, nach der der Beobachter in den Lichtweg eingebunden ist, wohingegen der Beobachter bei der genannten Brechung von der Seite auf den Lichtweg blickt. Insbesondere bei Studierenden des Lehramts ist zu erwarten, dass den Probanden das gezeigte Phänomen vertraut ist. Davon ist bei der Abbildung C.3 nicht ohne weiteres auszugehen. Erklärungen dieses Phänomens der scheinbaren *Knickung* eines ausgedehnten Gegenstandes erfordern einen weiteren Abstraktionsschritt, nämlich von einem punktförmigen Gegenstand, der sich vollständig in einem anderen Medium befindet als das, in dem der Beobachter ist, hin zu einem ausgedehnten Gegenstand, der sich in beiden Medien befindet. Darüber hinaus kontrastiert der scheinbare Knick *nach oben* in dem abgebildeten Stift das (tatsächliche) Abknicken *nach unten* des Laserstrahls in Abbildung C.1. Wagner (2013) konnte zeigen, dass diese Kontrastierung zu Konfusionen in Erklärungsversuchen führt und teilweise in Skizzen zu den Erklärungen an Objekte (wie z.B. den gezeigten Stift) Winkel und Lote ähnlich wie in der Strahlenskizze eingezeichnet wurden.

Stichprobe: Die Vorstudie umfasst dabei Untersuchungen von insgesamt elf mündlichen oder schriftlichen Erklärungen zu den genannten Phänomenen (vgl. Tabelle C.1). Der Lehrbuchtext B1-B bezieht sich dabei zwar auf das Phänomen der scheinbaren Hebung, erfolgte jedoch im Gegensatz zu den anderen untersuchten Erklärungen nicht auf Basis der Abbildung C.2.

Die Erklärungen E03-A, E03-A2, E03-B und E03-C stammen von einem Experten, der sich im Rahmen seiner Arbeit durch eine fachliche Analyse ein Spezialwissen angeeignet hat, welches die Bezeichnung als Experte beispielsweise nach Gläser und Laudel (2010) rechtfertigt. Die Erklärungen S01-A, S01-C, S04-A, S06-B, S07-C und S09-B stammen von Bachelorstudierenden der Physik mit Lehramtsoption. Die mündlichen Erklärungen S01-A, S01-C, S04-A wurden transkribiert. Aus den Transkriptionen wurden einfache Aussagen (*semantische Einheiten*) gewonnen, die sprachlich geglättet den fachlichen Inhalt der Transkription widerspiegeln. Dieser Schritt der Glättung wurde hinsichtlich seiner Güte nicht überprüft. Die Aussagen der Untersuchung beziehen sich in den drei Fällen daher explizit auf diese semantischen Einheiten und nicht auf die ursprüngliche sprachliche Erklärung. Für die Einschätzung der Gütekriterien (VF-1) wurden

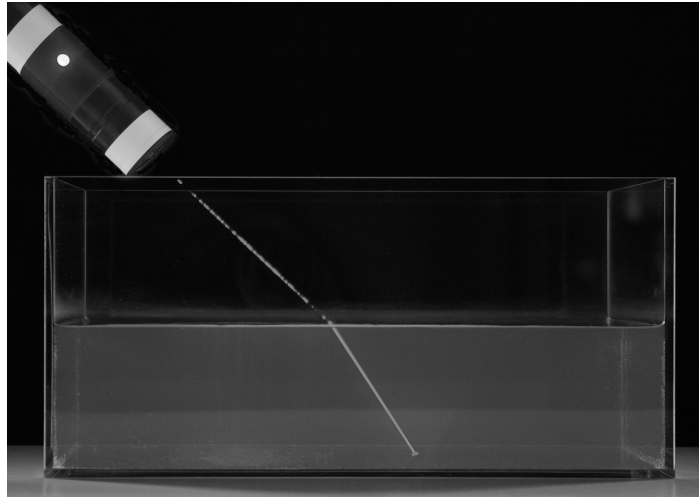


Abbildung C.1: Phänomen A - Brechung eines Laserstrahls

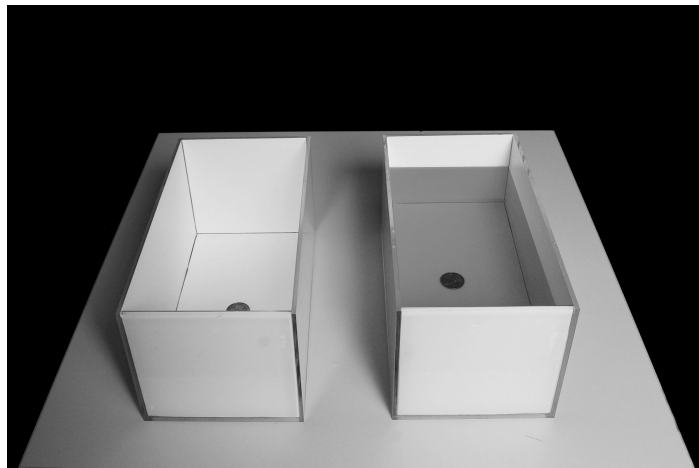


Abbildung C.2: Phänomen B - Optische Hebung einer Münze

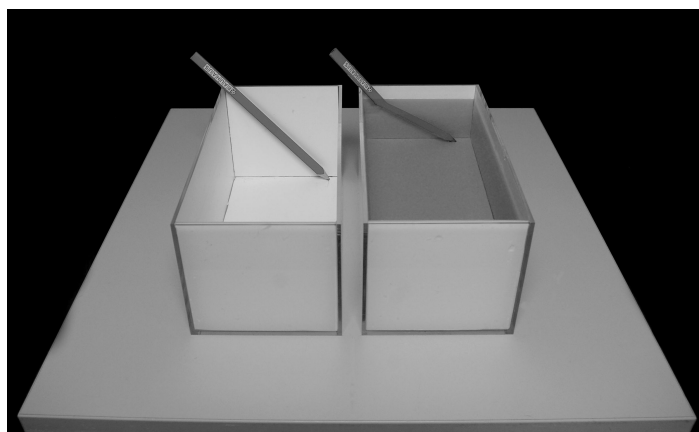


Abbildung C.3: Phänomen C - Scheinbarer Knick in einem Stift

Tabelle C.1: Übersicht über die Erklärungen der Vorstudie

ID	PHÄNOMEN	FORM DER ERKLÄRUNG	BEURTEILERÜBEREINSTIMMUNG		
			KODIERUNG DER ELEMENTE	KODIERUNG DER BEZIEHUNGEN	FACHL. BEWERTUNG
bi-B	Münze	Lehrbuchtext			
eo3-A	Laserstrahl	schriftl. Erklärung			
eo3-A2	Laserstrahl	schriftl. Erklärung	x	x	
eo3-B	Münze	schriftl. Erklärung	x		
eo3-C	Stift	schriftl. Erklärung	x		
so1-A	Laserstrahl	mdl. Erkl. + sem.E.	x		
so1-C	Stift	mdl. Erkl. + sem.E.	x	x	x
so4-A	Laserstrahl	mdl. Erkl. + sem.E.	x		x
so6-B	Münze	schriftl. Erklärung			
so7-C	Stift	schriftl. Erklärung		x	
so9-B	Münze	schriftl. Erklärung	x		x

aus den eigenen Vorarbeiten einige Erklärungen unter pragmatischen Gesichtspunkten ausgewählt (siehe Tabelle C.1), da einige Erklärungen für den jeweiligen Schritt als Trainingsexemplare dienten und somit nicht mehr für eine Beurteilerübereinstimmung zur Verfügung standen.

C.3 ERGEBNISSE

C.3.1 Güte der Identifikation und Kategorisierung von Elementen

Für die Kodierung aller Elemente der gesamten Stichprobe ergibt sich eine substanzielle Übereinstimmung (nach Landis & Koch, 1977, $\kappa = 0,73$, Tab. C.2) zwischen zwei Beurteilern. Bei einem 95%-igen Konfidenzniveau ergibt sich ein Vertrauensbereich für κ von 0,63 $\leq \kappa \leq$ 0,83. Für die sieben einzelnen Erklärungen können eine moderate, drei substanzielle, zwei fast perfekte und eine perfekte Beurteilerübereinstimmung festgestellt werden (siehe Tab. C.2). Eine Kategorie "o" enthält alle Nichtkodierungen eines Beurteilers und prüft damit, ob ein Element von einem Beurteiler nicht erkannt wurde (vgl. Wirtz & Caspar, 2002).

Tabelle C.2: Beurteilerübereinstimmung für die Kodierung der Elemente ausgewählter Erklärungen der Vorstudie

ERKLÄRUNG	RELATIVE ÜBEREINSTIMMUNG	ZUFÄLLIGE ÜBEREINSTIMMUNG	COHENS κ	EINSCHÄTZUNG (NACH LANDIS & KOCH, 1977)
eo3-2-A	0,77	0,41	0,61	substanziell
eo3-B	0,72	0,43	0,51	moderat
eo3-C	0,88	0,44	0,78	substanziell
so1-A	0,92	0,52	0,84	(fast) perfekt
so1-C	0,92	0,79	0,64	substanziell
so4-A	1	0,36	1	perfekt
so9-B	0,9	0,46	0,82	(fast) perfekt
gesamt	0,85	0,45	0,73	substanziell

In der Kontingenztafel (Tab. C.3) kann eine Häufung der Einigkeit beider Kodierer für die Einstufung eines Elements in die Kategorie 2 'relevantes Element des Phänomens' (70 von insges. 132 Fällen bzw. 70 von

112 Übereinstimmungen) oder in die Kategorie 3 '*relevantes Element der Theorie*' festgestellt werden. Die Kategorie 1 '*nicht relevantes Element des Phänomens*' wurde nur in einem Fall von einem Kodierer gewählt. Mehrere Zellen in der Kontingenztafel bleiben leer. Insgesamt gibt es elf Fälle, die vom Kodierer zwei nicht kodiert wurden, welche jedoch vom Kodierer eins als relevante Elemente (Code 2 und 3) kodiert wurden. Insgesamt gibt es 14 Fälle, die von mindestens einem Kodierer nicht kategorisiert wurden.

Tabelle C.3: Kontingenztafel der Beurteilerübereinstimmung zur Kategorisierung der Elemente in der Vorstudie

CODER 1 \ CODER 2	0	1	2	3	4	SUMME
0	0	1	1	1	0	3
1	0	0	0	0	0	0
2	6	0	7	0	0	13
3	5	0	1	39	2	47
4	0	0	0	0	3	3
SUMME	11	1	72	43	5	132

Die semantische Gültigkeit als Aspekt der Validität wird durch die Einschätzung eines unabhängigen Experten auf Basis der Kriterien und Ankerbeispiele aus dem Kodiermanual überprüft (Mayring, 2010).

Die Einschätzung dieses Experten wird hier in Worten wiedergegeben:

Unter der Annahme eines angemessenen Erwartungshorizonts für die Zielgruppe kann die Kategorienbeschreibung weitgehend trennscharf zwischen Elementen des Phänomens (was im weitesten Sinn der Beobachtung zugänglich ist) und Elementen der Theorie (die als 'erdachte' Konstrukte gelten können) unterscheiden. Es kann davon ausgegangen werden, dass nur in wenigen Einzelfällen Schwierigkeiten auftreten (wenn z. B. Probanden Theorie-behaftete Elemente im phänomenologischen Sinn verwenden, wie das z. B. bei dem Begriff 'Lichtstrahl' der Fall sein kann). Hier wird aber in der Regel aus dem Kontext der Verwendung des Elements klar, wie die Zuordnung zu erfolgen hat. Die Zuordnung der Elemente zu 'relevant' und 'nicht relevant' ist klar und eindeutig beschrieben.

C.3.2 Güte der Identifikation von Beziehungen

Eine Beziehung mit ihrem jeweiligen Quell- und Zielobjekt (in Form eines Elements oder ebenfalls einer Beziehung) bildet eine Aussage. Die Identifikation der Beziehungen erfolgt somit durch die Identifikation der Aussagen. Für jeden Beurteiler werden, wie im Kapitel D des Anhangs dargelegt, die Aussagen gezählt, die in der Menge aller Aussagen des jeweils anderen Beurteilers gefunden werden können. Diese Anzahl wird durch die Gesamtzahl der getroffenen Aussagen dividiert. Daraus ergibt sich eine relative bzw. prozentuale Beurteilerübereinstimmung für die Propositionen einer Erklärung. Die Aussage eines Beurteilers kann mehrere Aussagen eines anderen Beurteilers enthalten. Dadurch kann die Anzahl der Aussagen eines Beurteilers, die in den Aussagen des jeweils anderen Beurteilers enthalten sind, größer sein als die Gesamtzahl der Aussagen des anderen Beurteilers.

89% der identifizierten Aussagen eines Beurteilers können auch in den identifizierten Aussagen des jeweils anderen Beurteilers gefunden werden. Da die zufällige Übereinstimmung wie im Kapitel *Gütekriterien* gezeigt bei der Identifikation von Beziehungen vernachlässigbar ist, kann die prozentuale Übereinstimmung eingeschätzt werden. Nach Landis und Koch (1977) liegt damit eine fast perfekte Übereinstimmung vor. Der Beurteiler 1 hat insgesamt $\sum \#p_1 = 64$ Propositionen identifiziert, wovon 54 in den Aussagen des Beurteilers 2 gefunden werden können. Dieser konnte $\sum \#p_2 = 56$ Propositionen identifizieren, wovon 53 in den Aussagen des ersten Beurteilers enthalten sind.

Tabelle C.4: Beurteilerübereinstimmung für die Identifikation von Propositionen ausgewählter Erklärungen der Vorstudie

ERKLÄRUNG	$\#p_1 \in P_2$	$\#p_2 \in P_1$	RELATIVE GEGENSEITIGE ÜBEREINSTIMMUNG
eo3-2-A	32/40	30/35	0,83
so1-C	16/16	15/15	1
so7-C	6/8	6/6	0,86
Gesamt	54/64	53/56	0,89

C.3.3 Güte der fachlichen Bewertung

Die relative Übereinstimmung in der fachlichen Bewertung liegt bei 0,93, wobei die zufällige Einigkeit 0,67 beträgt. Beide Beurteiler waren sich in der Einschätzung von Propositionen als fachlich korrekt (Kategorie 1) besonders häufig einig (75,9%). In der Bewertung einer Aussage als fachlich inkorrekt lag in 16,7% der Fälle ein Einverständnis vor. Abweichungen zwischen den Beurteilern gab es ausschließlich in der Konstellation, in der Coder 1 eine Proposition als fachlich korrekt bewertet hat, welche durch den Coder 2 als fachlich inkorrekt bewertet wurde. Der umgekehrte Fall trat nicht ein.

Tabelle C.5: Kontingenztafel der Beurteilerübereinstimmung zur fachlichen Bewertung in der Vorstudie

CODER 1 \ CODER 2	0	1	SUMME
0	9	0	9
1	4	41	45
Summe	13	41	54

Tabelle C.6: Kennwerte für die Beurteilerübereinstimmung der fachlichen Bewertung

KENNWERT	GRÖSSE
prozentuale Übereinstimmung	PÜ = 92,6%
zufällige Übereinstimmung	PÜ _{Zufall} = 67,3%
Cohens κ	κ = 0,77
ϕ -Koeffizient	ϕ = 0,79
Fisher-Yates-korrigierter χ^2_{cor} -Wert	χ^2_{cor} = 29,26
kritischer χ^2_{cor} -Wert (0,95, 1)	χ^2_{krit} = 3,84

Da die Anzahl der bewerteten Aussagen < 60 ist, wird zur Prüfung der Signifikanz der Übereinstimmung beider Beurteiler der nach Fisher-Yates korrigierte χ^2_{cor} -Wert berechnet (Wirtz & Caspar, 2002). Da $\chi^2_{cor} = 29,26 > \chi^2_{krit(0,95,1)} = 3,84$ ist, kann die Übereinstimmung als überzufällig betrachtet werden. Beide Urteiler korrelieren mit $\phi = 0,79$. Das zufallsbereinigte Maß der Beurteilerübereinstimmung Cohens κ ist mit $\kappa = 0,77$ nach Landis und Koch (1977) als substantiell einzuschätzen. Die Häufung der Einstufung von Propositionen als 'korrekt' (Kategorie 1) führt zu einer Verschlechterung κ -Wertes.

Die semantische Gültigkeit als Aspekt der Validität wird wie in der Beurteilung der Güte der Identifikation und Kategorisierung der Elemente durch die Einschätzung eines unabhängigen Experten auf Basis der Kriterien und Ankerbeispiele aus dem Kodiermanual überprüft (Mayring, 2010) und lautet für die im Kodiermanual aufgeführten Kriterien:

Im Spiegel eines Erwartungshorizonts bzgl. der Aufgabe für die Zielgruppe der Studierenden der Physik - die sich mit dem Thema der optischen Brechung in Vorlesungen beschäftigt haben - decken die Kriterien alle relevanten Fälle inkorrekt und nicht ausreichender (z. B. wegen zu großer Oberflächlichkeiten) Propositionen ab. Die Referenzbeispiele illustrieren die Kriterien sehr gut. Meiner Einschätzung nach führen die Kriterien zu einer verlässlichen Bewertung der Propositionen.

C.3.4 Merkmale kategorienorientierter Concept Maps

Zu jeder Erklärung aus der Vorstudie kann eine kCM aufgestellt werden. Die kCMs unterscheiden sich deutlich voneinander in verschiedenen Merkmalen.

Elemente: Zunächst können Elemente in allen vier Kategorien gefunden werden. Die Zahl der gesamten Elemente in einer kCM variiert stark (Minimum = 5 Elemente in so7-C, Maximum = 39 Elemente in eo3-A2 und eo3-B). Die Verteilung der Elemente auf die Kategorien Phänomen und Theorie unterscheidet sich ebenfalls stark von einander, und zwar sowohl absolut (Minimum Phänomen = 1 Element in so7-C, Maximum Phänomen = 15 Elemente in eo3-B und so9-B, Minimum Theorie = 1 Element in so1-C, Maximum Theorie = 22 Elemente) als auch relativ bezogen auf die Gesamtzahl der Elemente in jeder einzelnen kCM (Minimum Phänomen = 0,12 in eo3-A, Maximum Phänomen = 0,92 in so1-C, Minimum Theorie = 0,08 in so1-C, Maximum Theorie = 0,88 in eo3-A). Die Zahl der Elemente in den Kategorien mit nicht relevanten Elementen liegt bei maximal zwei nicht relevanten Elementen der Theorie in so6-B sowie einem nicht relevanten Element des Phänomens in eo3-B. Insgesamt enthalten drei der elf kCMs nicht relevanten Elemente.

Durch die Konvention, Elemente des Phänomens bzw. der Theorie horizontal in Abhängigkeit von ihrer Verbindung zur jeweils anderen Domäne (Phänomen, Theorie) anzuordnen, ergeben sich auch in Bezug auf diese Verteilung (in 'Spalten') deutlich sichtbare Unterschiede. Dabei sind im Folgenden die Formulierung 'in Beziehung stehen' und 'verbunden sein' zu unterscheiden. Zwei Elemente sind 'miteinander verbunden', wenn es eine lückenlose Verbindung über Beziehungen, Metabeziehungen und gegebenenfalls weiteren Elemente gibt. Zwei Elemente stehen 'in Beziehung miteinander', wenn es zwischen ihnen eine lückenlose Verbindung nur über Beziehungs- oder Metabeziehungsknoten gibt. Zwei Elemente stehen nicht miteinander in Beziehung, wenn zwischen ihnen mindestens ein weiteres Element liegt oder es keine lückenlose Verbindung dazwischen gibt. Zwei Elemente sind nicht miteinander verbunden, wenn zwischen ihnen weder eine (Meta-)Beziehung noch ein anderes Element liegt. Sie befinden sich dann in voneinander getrennten 'Fragmenten'.

Die maximale Anzahl der mit der Theorie in Beziehung stehenden Elemente des Phänomens liegt bei zehn (eo3-A, eo3-C), die minimale Anzahl bei eins (so7-C). Die maximale Anzahl der Elemente des Phänomens, die nicht mit Elementen der Theorie in Beziehung stehen bei 13 (so9-B), die minimale Anzahl bei null (b1-B). Die maximale Anzahl der mit Elementen des Phänomens in Beziehung stehenden Elemente der Theorie ist zwölf (eo3-A2), die minimale Zahl eins (so1-C). Nicht mit dem Phänomen in Beziehung stehende Elemente der Theorie tauchen besonders selten in den Erklärungen so1-C, so4-A, so7-C und so9-B auf (null), sowie besonders häufig in eo3-A (19). Auch relativ in Bezug auf die jeweils gesamte Zahl der Elemente in einer kCM können entsprechende Unterschiede gefunden werden.

Eine besondere Stellung haben die kCMs eo3-A sowie eo3-A2 im Vergleich zueinander. Es handelt sich um Erklärungen auf Basis des gleichen Fotos (A - Brechung) durch den gleichen Experten (eo3), die jedoch deutliche formale Unterschiede in der Verteilung der Elemente auf die Kategorien und auf die Spalten innerhalb der Kategorien Phänomen bzw. Theorie aufweisen. Der Experte hat diese Erklärungen nacheinander unter Berücksichtigung der zwei möglichen Betrachtungsweisen dieser Abbildung (siehe oben, Abschnitt C.2 'Methode') gegeben. Während in der kCM eo3-A nur drei Elemente des Phänomens 22 Elementen der

Theorie gegenüber stehen, sind es in der kCM eo3-A in beiden Domänen jeweils 13 Elemente. Darüber hinaus sind in eo3-A von den 22 Elementen der Theorie nur drei mit Elementen des Phänomens verbunden, also 19 nicht mit Elementen des Phänomens verbunden. In eo3-A2 sind zehn der dreizehn Elemente des Phänomens mit der Theorie verbunden und zwölf Elemente der Theorie mit Elementen des Phänomens.

Beziehungen: Die Zahl der Beziehungen insgesamt unterscheidet sich in den kCMs deutlich voneinander (Minimum = 8 in so7-C, Maximum = 39 in eo3-A2 und eo3-B). Es können sowohl Beziehungen als auch Metabeziehungen identifiziert werden, die nur Elemente einer Domäne (also nur des Phänomens bzw. nur der Theorie) untereinander oder beide Domänen miteinander verbinden. Die Verteilung der Beziehungen auf diese drei Bereiche (*phph* - Bez. innerhalb des Phänomens, *phth* - zwischen Phänomen und Theorie, *thth* - innerhalb der Theorie) variiert dabei stark sowohl absolut als auch relativ auf die Gesamtzahl der Beziehungen. Die Zahl der Beziehungen im Bereich *phph* reicht von eins (so7-C) bis 17 (so9-B), im Bereich *phth* von zwei (so1-C) bis 24 (eo3-B, eo3-C) und im Bereich *thth* von null (so1-C) bis 17 (eo3-A). Inkorrekte Beziehungen können in den kCMs so1-C, so4-A, so7-C, so9-B gefunden werden. Alle inkorrekten Beziehungen liegen im Bereich *phth*, also zwischen Phänomen und Theorie. In den kCMs zu den Erklärungen der Experten können keine inkorrekten Beziehungen identifiziert werden.

weitere Merkmale: Die kCM so1-C weist die Besonderheit auf, dass sie aus zwei Teilen besteht, die nicht miteinander verbunden sind (2 *Fragmente*). Wenn in kCMs nicht relevante Elemente und inkorrekte Beziehungen eliminiert werden, verändert sich dadurch die Struktur der kCMs teilweise stark. In den Abbildungen C.4, C.5, C.6, C.7, C.8 und C.9 sind für drei ausgewählte Erklärungen die ursprünglichen kCMs und die durch die Eliminierung bereinigten kCMs jeweils gegenüber gestellt.

Durch diese Gegenüberstellung werden die Veränderungen in der Struktur erkennbar. Beispielsweise zeigt sich eine Veränderung in einer (weiteren) Fragmentierung der kCMs. Dabei können vertikale Fragmentierungen entstehen, wenn die Fragmente jeweils Elemente des Phänomens *und* der Theorie enthalten (z.B. so4-A in Abb. C.5), horizontale Fragmente, wenn die Fragmente jeweils nur Elemente des Phänomens *oder* der Theorie enthalten (z.B. so7-C in Abb. C.7) oder sowohl vertikale als auch horizontale Fragmentierungen aufweisen (z.B. so9-B in Abb. C.9). Die Fragmente in den Beispielen sind jeweils durch rote Ellipsen gekennzeichnet.

Darüber hinaus verändern sich durch die Eliminierung fachlich inkorrektter Beziehungen und nicht relevanter Elemente die Verteilungen der Elemente auf die Spalten innerhalb des Phänomens bzw. der Theorie sowie der Beziehungen auf die Bereiche *phph*, *phth* und *thth*. Während beispielsweise in so7-C die kCM vor der fachlichen Bewertung insgesamt ein Element des Phänomens enthält, das mit Elementen der Theorie in Beziehung steht, ist dies nach der Bereinigung nicht mehr der Fall. Das einzige Element des Phänomens steht nun nicht mehr in Beziehung mit irgend einem Element der Theorie. Gleichzeitig lagen in der gleichen kCM vor der Bereinigung insgesamt fünf Beziehungen im Bereich *phth*, also zwischen Elementen des Phänomens und der Theorie, wohingegen nach der Bereinigung dort keine Beziehungen mehr vorhanden sind.

Weiterhin können Merkmale in Teilstrukturen der kCMs identifiziert werden. Exemplarisch werden in den Abbildungen C.10, C.11, C.12 und C.13 die Teile der jeweiligen kCMs dargestellt, die den Lichtweg unter Berücksichtigung der Brechung repräsentieren. Dabei ist in der Abbildung C.10 dieser Lichtweg innerhalb der gesamten kCM hervorgehoben und in Abbildung C.11 zum Zweck der besseren Lesbarkeit nur die entsprechende Teilstruktur. Anhand dieses Beispiels können die Lichtwege in verschiedenen kCMs miteinander verglichen werden. So bezieht die kCM bi-B sieben Elemente in den Lichtweg unter Berücksichtigung der Brechung ein, ausgehend von der *Münze* über die *Grenzfläche* bis zum *Beobachter*. Dagegen fehlt in der kCM so6-B in Abbildung C.12 sowohl die *Münze* als auch der *Beobachter*. In der kCM so1-C in Abbildung C.13 ist nur der Begriff der Brechung als einziges Element genannt.

Schließlich können bedingt durch die netzwerkartige Struktur kategorienorientierter Concept Maps

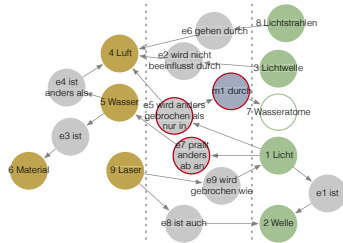


Abbildung C.4: so₄-A (ursprünglich)

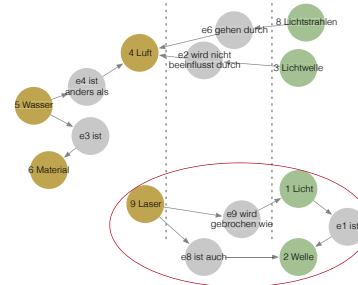


Abbildung C.5: so₄-A (bereinigt)

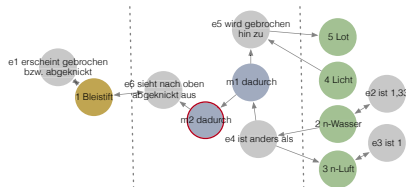


Abbildung C.6: so7-C (ursprünglich)

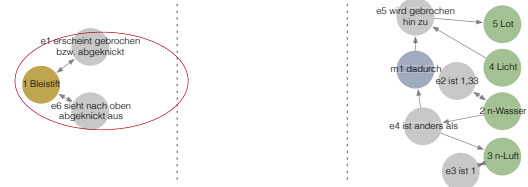


Abbildung C.7: so7-C (bereinigt)



Abbildung C.8: so9-B (ursprünglich)



Abbildung C.9: so9-B (bereinigt)

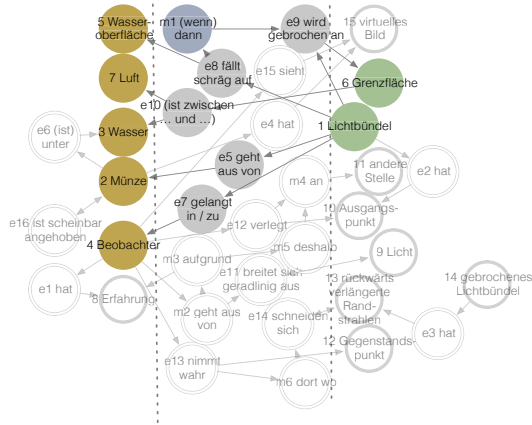


Abbildung C.10: Lichtweg mit Brechung in bi-B, andere Elemente und Beziehungen sind ausgegraut

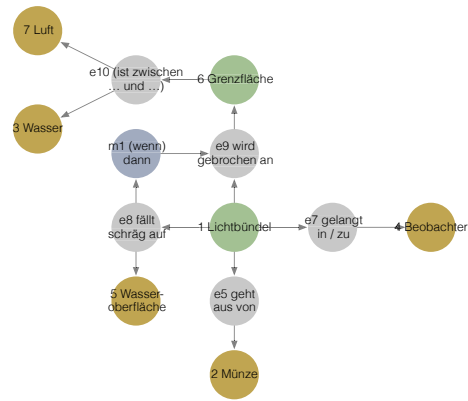


Abbildung C.11: Lichtweg mit Brechung in bi-B, ohne horizontale Struktur gemäß der Konventionen für kCMs



Abbildung C.12: Lichtweg mit Brechung in so6-B, ohne horizontale Struktur gemäß der Konventionen für kCMs



Abbildung C.13: Lichtweg mit Brechung in soi-C

auch Netzwerkparameter visualisiert werden, wie beispielsweise die Zentralitäten von Knoten. Zentralitäten geben die Bedeutungen von Knoten für das Netzwerk aus verschiedenen Perspektiven an. Exemplarisch werden in den Abbildungen C.14 und C.15 die Zwischenzentralitäten über die Größe der Knoten visualisiert. Die Zwischenzentralität für einen bestimmten Knoten gibt an, auf wie vielen kürzesten Verbindungen zwischen allen Knoten dieser Knoten liegt. Werte mit einer hohen Zwischenzentralität haben in Netzwerken unter Umständen eine Funktion als „*cutpoint*“ (Mutschke, 2010, S. 370, Hervorhebung durch Verfasser) oder Organisator: Werden sie eliminiert, zerfällt das Netzwerk in einzelne, sonst nicht miteinander verbundene Teile. Die Werte für die Zwischenzentralität (engl. *betweenness centrality* oder nur *betweenness*) der einzelnen Knoten wurden hier mit Hilfe des Netzwerkanalysertools („Gephi“, 2016) berechnet. Dabei wurden die Zwischenzentralitäten auf einen Wert zwischen null und eins normiert. Alle Knoten mit einem Wert null haben in der Darstellung die gleiche (kleinste) Größe, ebenso haben alle Knoten mit der jeweils in der kCM größten normierten Zwischenzentralität die gleiche Größe. Die Werte für die normierte Betweenness können den Tabellen E.1 und E.2 im Anhang E entnommen werden. Durch die Konvention, sowohl Elemente als auch Beziehungen als Knoten in kCM's darzustellen, können somit sowohl Elementen als auch Beziehungen Werte für die Zentralität innerhalb der kCM als Netzwerk beigemessen werden.

In den ausgewählten Experten-kCMs bi-B in Abbildung C.14 und eo3-B in Abbildung C.15 hat der Beobachter als Element eine besonders zentrale Stellung, wobei in eo3-B der Beobachter die mit Abstand größte Betweenness aufweist, während in bi-B das Element *Lichtbündel* eine ähnlich zentrale Stellung hat.

C.4 INTERPRETATION UND IMPLIKATIONEN

C.4.1 Identifikation und Kategorisierung von Elementen

Eine substanzielle Übereinstimmung beider Kodierer in der Identifikation und Kategorisierung der Elemente stellt eine zulässige Ausgangsbasis für die weiteren Schritte beim Erstellen von kategorienorientierten Concept Maps dar. Insbesondere die Häufung der Einigkeit in den Kategorien 2 und 3 (relevante Elemente

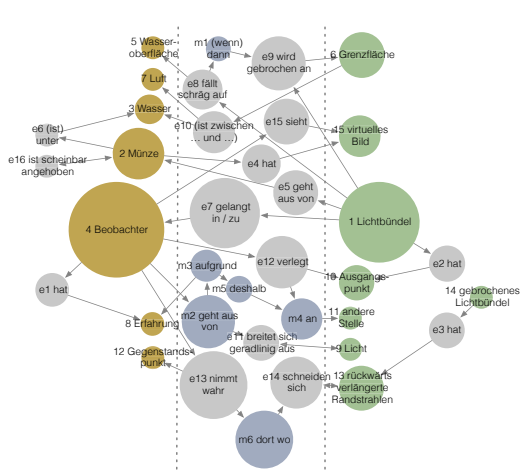


Abbildung C.14: b1-B mit Berücksichtigung der Betweenness

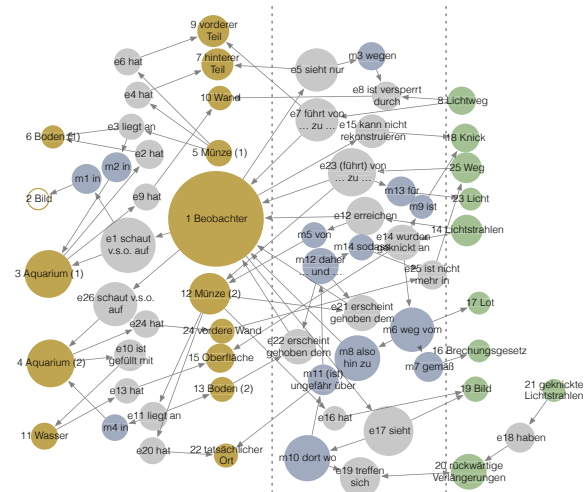


Abbildung C.15: e03-B mit Berücksichtigung der Betweenness

des Phänomens bzw. der Theorie: 82,6% aller Fälle) sowie mehrere unbesetzte Zellen in der Kontingenzmatrix in Abbildung D.1 (14 von insgesamt 25 Zellen) führen zu einer niedrigen Schätzung der Übereinstimmung durch den Wert κ (Wirtz & Caspar, 2002). Für eine Schwächung des κ -Wertes kann vor allem die Kategorie null verantwortlich gemacht werden. Ohne diejenigen Einträge in der Matrix, in der einer der Beurteiler ein Element nicht kodiert hat, gibt es neun unterschiedliche und 112 gleiche Kodierungen, was einer relativen Übereinstimmung von 0,92 entspricht, wohingegen durch Hinzunahme der Kategorie null die relative Übereinstimmung der Wert für die relative Übereinstimmung auf 0,85 sinkt. Diese Kategorie trägt nur zur Zahl der Nichtübereinstimmungen bei. Eine Verbesserung der Einigkeit kann erzielt werden, wenn beide Beurteiler weniger Elemente nicht aufdecken. Dabei konnte der Kodierer 1 elf Elemente identifizieren, die der Kodierer 2 nicht gefunden hat. Umgekehrt hat der Kodierer 2 *nur* drei Elemente identifiziert, die dem Kodierer 1 verborgen blieben. Für diese Ungleichverteilung kann vor allem die unterschiedliche Tendenz der Beurteiler verantwortlich gemacht werden, in Pluralkonstruktionen und in Homonymen verschiedene Elemente zu erkennen. In der Erklärung e03-B (Hebung) hat der Kodierer 2 beispielsweise das Wort „Münze“ als ein Element kodiert, wohingegen der Kodierer 1 zwei Münzen identifiziert hat, nämlich eine Münze im linken Becken und eine im rechten Becken. Beide werden durch das Wort Münze bezeichnet, stellen jedoch unterschiedliche Begriffe mit verschiedenen Bezugsobjekten dar. Daher sollen im Kodiermanual konkrete Hinweise auf die Identifikation von Homonymen und Pluralkonstruktionen aufgenommen werden.

C.4.2 Identifikation von Beziehungen

Die relative Übereinstimmung von 0,89 in der Identifikation von Beziehungen kennzeichnet diesen Schritt als besonders zuverlässigen Teil des Verfahrens. Auf Basis der gleichen kategorisierten Elemente sind etwa 89% der von einem Beurteiler identifizierten Beziehungen in den vom jeweils anderen Beurteiler identifizierten Beziehungen enthalten. Ein möglicher Extremfall, der durch den Umstand gegeben wäre, dass ein Kodierer besonders viele Beziehungen aufgedeckt hat, die zwar in den Beziehungen des anderen Beurteilers enthalten sind, ohne dass dies umgekehrt der Fall wäre, konnte nicht gefunden werden. Eine Besonderheit stellt die Beurteilerübereinstimmung mit dem Wert "1" für die Erklärung s01-C dar. Dabei hat Beurteiler 1 insgesamt 16 Beziehungen identifiziert, der Beurteiler 2 dagegen nur 15. Der Wert für die Übereinstimmung von 1 kommt trotz der ungleichen Zahl der identifizierten Beziehungen dadurch zustande, dass der Beurteiler 1 die Beziehung e12 „stumpfer Winkel → liegt zwischen → Stift (unter Wasser) und Stiftteil (über

Wasser)“ in zwei Aussagen unterteilt hat, wodurch die entstehende Aussage in der Kodiertabelle zwei Zeilen belegt und zweifach gezählt wird, der Beurteiler 2 jedoch die Aussage durch zwei Zielelemente (Stift über Wasser und Stiftteil unter Wasser) in einer Zeile der Kodiertabelle gekennzeichnet hat und diese damit nur einmal gezählt wird. Das Verhalten der beiden Beurteiler kann jedoch als *Übereinstimmung* in der Identifikation der Beziehung gewertet werden. Dabei erscheint das von Kodierer 2 angewendete Verfahren geeigneter, weil hierbei tatsächlich in einer Zeile der Kodiertabelle eine vollständige und evaluierbare Aussage entsteht. Diese Variante soll als Standard im Kodiermanual verankert werden.

C.4.3 Fachliche Bewertung

Ein Bewertungssystem mit nur zwei Kategorien führt dazu, dass die Übereinstimmung durch Cohens κ eher gering eingeschätzt wird (Wirtz & Caspar, 2002). Trotz hoher zufälliger Einigkeit ruft die fachliche Bewertung von Aussagen eine substanzielle Übereinstimmung beider Beurteiler hervor. Der Kodierer 1 hat vier Aussagen als fachlich korrekt eingeschätzt, die der Kodierer 2 als inkorrekt bewertet hat. Eine Betrachtung dieser vier Fälle der Abweichungen zeigt, dass einer der Fälle eine Folge eines anderen Falls ist (so1-C, Metabeziehung m2 als Folgefehler von e9): Die Bewertung einer Beziehung als fachlich inkorrekt führt im Prinzip sicher dazu, dass eine Metabeziehung, die die inkorrekte Beziehung als Quelle oder Ziel hat, ebenfalls als inkorrekt bewertet wird. In den anderen drei Fällen kann inhaltlich keine systematische Abweichung entdeckt werden.

C.4.4 Zwei inhaltliche Argumente für die Validität des Verfahrens

Eine Besonderheit stellen die beiden Erklärungen des Experten e03 zum Phänomen des gebrochenen Laserstrahls (e03-A, e03-A2) dar. Die kCMs zu den beiden Erklärungen des gleichen gezeigten Phänomens unterscheiden sich deutlich voneinander, vor allem formal in der Verteilung der Elemente auf die Kategorien 2 (Phänomen, relevant) und 3 (Theorie, relevant) und auf die Spalten innerhalb der Kategorien. Der Teilnehmer hat auf Basis des gleichen Fotos zwei unterschiedliche Strukturen erkannt. In der Erklärung e03-A (Abb. C.16, links) wird die Brechung von Lichtstrahlen als innertheoretisches Konzept dargestellt und zum Wellenkonzept von Licht („Primärwellen“, „Überlagerung“, ...) in Bezug gebracht. Die gezeigte Abbildung des gebrochenen Laserstrahls wird als fotografische Realisierung der Strahlenskizze aufgefasst, die häufig im Rahmen der Brechung gefunden werden kann. Für die Darlegung ist beispielsweise ein Beobachter und dessen Einblickwinkel in das Aquarium irrelevant. Deshalb tauchen Elemente und Beziehungen dieser Art in der Erklärung auch nicht auf. Gleichzeitig werden viele theoretische Elemente in Beziehung zueinander gesetzt, ohne dass diese direkt mit beobachtbaren Elementen verbunden wären. Dagegen wird in der Erklärung e03-A2 in Abbildung C.16 (rechts) der Beobachter und seine Perspektive explizit in die Erklärung eingebunden. Hier wird der gezeigte Laserstrahl in der gleichen Art wie die scheinbare Hebung erklärt. Die Tatsache, dass sich diese zwei konzeptionell unterschiedlichen Betrachtungsweisen des gezeigten Fotos derart deutlich und sinnvoll in den betreffenden Maps widerspiegeln, ist ein Indiz für die semantische Gültigkeit als Aspekt der Validität des entwickelten Verfahrens.

Schließlich können auf Basis der Visualisierung der Betweenness in kategorienorientierten Concept Maps Aussagen über die Bedeutung von Elementen (und Beziehungen) in Erklärungen gemacht werden. So haben in den Erklärungen b1-B und e03-B des Phänomens der scheinbar gehobenen Münze (Abb. C.14 und C.15) jeweils die Beobachter eine besonders zentrale Stellung. Diese zentrale Stellung kann als Besonderheit des gezeigten Phänomens gedeutet werden, da der Beobachter dabei Teil der Phänomenstruktur ist: Erstens endet der Lichtweg bei ihm, wie z.B. in der Lichtweg-Figur in Abbildung C.11 sichtbar wird, zweitens ist er dasjenige Element, welches das Bild der Münze konstruiert (e03-B - „Beobachter → sieht → Bild → ...) und drittens werden die sichtbaren Strukturen, wie z.B. die beiden Aquarien (e03-B, „→ schaut auf → Aquarium (1)“, „→ schaut auf → Aquarium (2)“ usw.), von ihm in Beziehung gesetzt. Die aus formalen Gesichtspunkten zentrale Stellung des Beobachters kann somit auch inhaltlich plausibel erklärt werden,

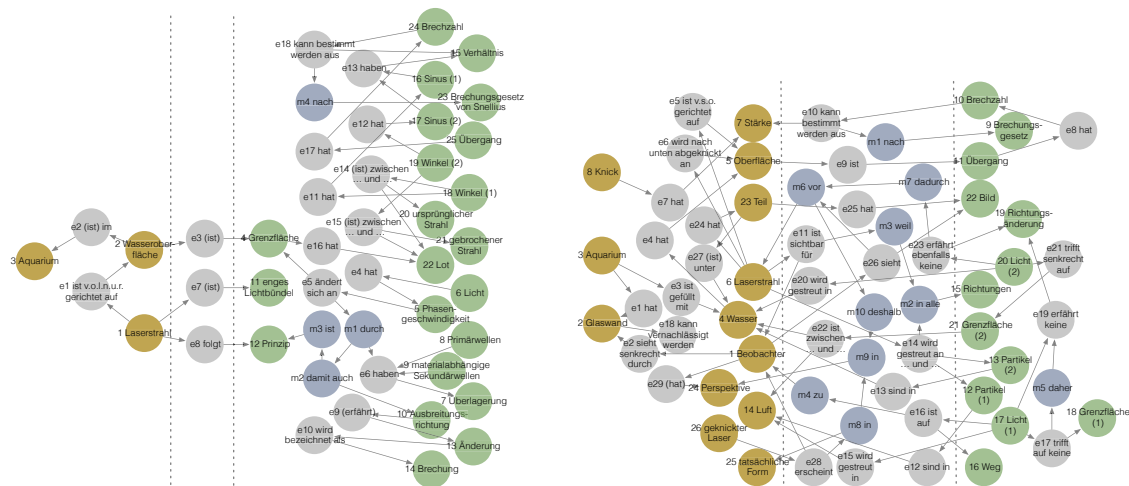


Abbildung C.16: Gegenüberstellung der beiden Erklärungen des Experten eo3 zum Phänomen A - geknickter Laserstrahl, links: Brechung als innertheoretisches Konzept, rechts: mit Perspektive des Beobachters

worin ein weiteres Argument für die Validität des Verfahrens liegt.

C.4.5 Merkmale kategorienorientierter Concept Maps

Wenn, wie zuvor gezeigt werden konnte, das im Kodiermanual dargestellte Verfahren schriftliche Erklärungen physikalischer Phänomene valide und reliabel in eine grafische Form zu übertragen imstande ist, dann können die Merkmale der Maps als Eigenschaften der Erklärungen interpretiert werden. Ebenso sind unterschiedliche Merkmalsausprägungen in kCMs als unterschiedliche Ausprägungen der Eigenschaften von Erklärungen zu deuten. Vor diesem Hintergrund ermöglicht das Verfahren, anhand der entstehenden Endprodukte (kategorienorientierte Concept Maps) präzise Aussagen darüber zu machen, was es heißt, im Rahmen einer sprachlichen Erklärung einen relevanten Phänomenausschnitt nicht angemessen in Beziehung zu dem betroffenen relevanten Theorieausschnitt setzen zu können. Die dargestellten Ergebnisse können vor diesem Hintergrund entsprechend als verschiedene Formen von Schwierigkeiten in sprachlichen Erklärungen gedeutet werden:

Fachlich inkorrekte Aussagen. Eine Schwierigkeit im Aufstellen einer Erklärung zu einem physikalischen Phänomen kann demnach in der fehlerhaften Verknüpfung von erkannten Entitäten mit dem fachlichen Wissen ausgemacht werden. Das heißt, in einer kCM gibt es Aussagen mit Beziehungen, die zwischen relevanten Elementen des Phänomens und der Theorie liegen und die fachlich inkorrekt sind. In der Vorstudie tritt diese Schwierigkeit in den Erklärungen so1-C, so4-A, so7-C und so9-B auf. Die betroffenen Beziehungen sind in kCMs durch einen roten Ring markiert, können klar verortet und ihre Quellen- und Zielelemente eindeutig benannt werden. In der Vorstudie liegen alle fehlerhaften Beziehungen zwischen dem dargestellten Phänomen- und Theoriebereich. Prinzipiell sind inkorrekte Aussagen jedoch in allen Bereichen von kCMs möglich. Die Fehler lassen sich durch die Kriterien zur fachlichen Bewertung aus dem Kodiermanual kennzeichnen und in einer größeren Stichprobe gegebenenfalls unter diesen Kriterien zusammenfassen.

Verkürzte Darstellung des relevanten Phänomenausschnitts. Die relevante Struktur des Phänomens wird sprachlich verkürzt dargestellt, sodass sie nicht angemessen in Beziehung zum Theorieausschnitt gesetzt werden kann. In den Maps zeigt sich diese Schwierigkeit darin, dass im Vergleich zur Zahl der relevanten Elemente der Theorie wenig relevante Elemente des Phänomens sichtbar sind (wie z.B. in so7-C). Mögliche

Ursachen können in einer unzureichenden Wahrnehmung des relevanten Ausschnitts oder mangelnden Fähigkeit zur sprachlichen Darstellung des erkannten Ausschnitts liegen.

Verkürzte Darstellung des relevanten Theorieausschnitts. Analog kann in sprachlichen Erklärungen der relevante Theorieausschnitt verkürzt dargestellt werden, sodass dieser nicht adäquat in Beziehung zum Phänomen gesetzt werden kann. Die Zahl der relevanten Theorieelemente in kCMs ist im Vergleich zu der Zahl der relevanten Phänomenelemente gering (so1-A, so1-C, so9-B). Diese Symptomatik kann möglicherweise auf ein fehlendes Fachwissen im Rahmen der entsprechenden Theorie zurückgeführt werden oder auf eine unzureichende Fähigkeit, dieses Fachwissen sprachlich auszuführen.

Verkürzte Gesamtdarstellung der relevanten Ausschnitte. Eine verkürzte Gesamtdarstellung besteht aus einer Verschmelzung der beiden zuvor genannten Problematiken. Sowohl die relevante Struktur des Phänomens als auch der relevante Theorieausschnitt enthält vergleichsweise wenig Elemente (so4-C, so7-B). Die Maps sind vergleichsweise *klein*, da kaum Aussagen mit Beziehungen zwischen den wenigen genannten Elementen geformt werden. Zumindest hypothetisch sind aber auch Maps mit wenigen Elementen, aber vielen Beziehungen dazwischen denkbar.

Fehlende Verbindung von Phänomen und Theorie. Der relevante Phänomen- bzw. Theorieausschnitt wird zwar vergleichsweise ausführlich dargestellt, aber kaum zueinander in Beziehung gesetzt. In kCMs würde sich dieses Verhalten dadurch zeigen, dass vor und / oder nach dem Eliminieren inkorrektur Beziehungen jeweils die äußeren Spalten des Phänomen- und Theoriebereichs stark mit Elementen besetzt sind und möglicherweise innerhalb der Bereiche viele Beziehungen hergestellt werden. Dieses Verhalten konnte jedoch in den Erklärungen der Vorstudie nicht gefunden werden.

Fragmentierte Erklärung. In sprachlichen Erklärungen werden die relevanten Phänomen- und Theoriestrukturen nur teilweise oder gar nicht in Beziehung zueinander gesetzt. Diese Formulierung kann wörtlich verstanden in kCMs entdeckt werden, nämlich dann, wenn sie vor und / oder nach einer Bereinigung durch das Eliminieren nicht relevanter Elemente und fehlerhafter Beziehungen in inkorrektur Aussagen in einzelne Teile bzw. Fragmente zerfallen. Diese Fragmente können dann wie z.B. in so4-A einzelne Phänomen- und Theoriebereiche miteinander verbinden, einzelne Elemente isolieren (so6-B), den dargestellten Phänomen- und Theoriebereich vollständig voneinander trennen (so7-C) oder mehrere Formen solcher Fragmentierungen aufweisen (so9-B). Für die Deutung dieser Fragmente als *p-Prims* im Rahmenkonzept von DiSessa (1988) kann in einer größeren Stichprobe gegebenenfalls Evidenz gesammelt werden.

Nicht relevante Elemente. Eine weitere Schwierigkeit im Aufstellen einer Erklärung zu einem physikalischen Phänomen besteht darin, mehrere nicht relevante Ausschnitte des Phänomens oder der Theorie unter- bzw. miteinander in Beziehung zu setzen. In kategorienorientierten Concept Maps wird diese Charakteristik dadurch sichtbar, dass in den ursprünglichen und (also noch nicht bereinigten) Maps mehrere Elemente der Kategorie 1 und 4 sichtbar sind. Diese Schwierigkeit wird in den Ergebnissen der Vorstudie nicht wiedergespiegelt, denn in den fotografischen Abbildungen der Phänomene Brechung, Hebung und Knickung, auf deren Basis die Erklärungen (außer br-B) erstellt wurden, ist weitgehend auf mögliche erkennbare Strukturen verzichtet worden, indem beispielsweise keine Schatten, Farben oder strukturierte Hintergründe erkennbar sind. Daher ist eine Häufung von nicht relevanten Elementen des Phänomens (Kategorie 1) auch nicht auszugehen, kann jedoch in einer größeren Stichprobe durchaus auftreten.

Fehlende zentrale Bestandteile. Schließlich kann eine Schwierigkeit auch in der Form auftreten, dass bestimmte Bestandteile einer Erklärung, die aus fachlicher Perspektive zentral sind, fehlen. Insbesondere können zentrale Elemente oder ganze Substrukturen bestehend aus Elementen und Beziehungen fehlen oder

verkürzt dargestellt werden. Ein solches zentrales Element ist für die Phänomene der Hebung und Knickung sowie (in Abhängigkeit von der Betrachtungsweise) eingeschränkt auch für die Brechung das Element des Beobachters. Daneben sind das reale Objekt sowie dessen scheinbar gehobenes Bild aus plausiblen, inhaltlichen Gründen als zentrale Elemente und aus fachlicher Perspektive die Beziehungen zwischen diesen drei Elementen sowie der Lichtweg als zentrale Figuren anzusehen. Diese Figuren können im Rahmen einer Untersuchung an einer größeren Stichprobe gegebenenfalls im Rahmenkonzept von Chi (1978) mit dem Begriff der *Chunks* in Verbindung gebracht werden

C.5 FAZIT DER VORSTUDIE

Das entwickelte Verfahren ist in der Lage, schriftsprachliche Erklärungen zuverlässig und valide in die visuelle Struktur von kategorienorientierten Concept Maps zu übertragen. In diesen Maps wurden formale und inhaltliche Merkmale identifiziert, die als Eigenschaften der Erklärungen vor dem Hintergrund des modellorientierten Rahmenkonzepts gedeutet werden können. Wenn die Struktur sprachlicher Erklärungen bestehend aus Elementen und Beziehungen sichtbar gemacht werden soll, dann sind netzwerkartige Darstellungen potenziell geeignete Möglichkeiten dafür. Im Gegensatz zu herkömmlichen Concept Maps oder Mindmaps, die weder die Phänomen-Theorie-Struktur noch die komplexen sprachlichen Aussagenformen zu erfassen in der Lage sind, können kategorienorientierte Concept Maps damit für die Untersuchung der Struktur sprachlicher Erklärungen verwendet werden. Auf dieser Grundlage sind vor allem auch präzise Aussagen über die Schwierigkeiten beim Aufstellen einer angemessenen sprachlichen Erklärung möglich.

D GÜTEKRITERIEN

Inhalt des Kapitels

D.1	Identifikation und Kategorisierung der Elemente	151
D.2	Identifikation der Beziehungen	151
D.3	Bewertung der Aussagen	153

Die etablierten Hauptgütekriterien für quantitative Forschung (Objektivität, Reliabilität und Validität) lassen sich nicht immer und nicht vollständig auf qualitative Forschungszusammenhänge übertragen (Steinke, 2013). Zudem handelt es sich in dieser Arbeit nicht um die Einschätzung eines Tests sondern eines Verfahrens zur Visualisierung bestimmter Strukturen, weshalb sich hier an eher inhaltsanalytischen Ausformulierungen der Einschätzung der Güte des Verfahrens orientiert werden soll. Darüber hinaus wird für diese Arbeit eine vollständige Dokumentation des Forschungsprozesses angestrebt, um die durchgeführten Schritte transparent und damit intersubjektiv nachvollziehbar zu gestalten. Nachfolgend werden für diese Arbeit zentrale Aspekte der Reliabilität und Validität genannt und es wird dargelegt, wie diese Aspekte in der Arbeit eingeschätzt werden.

Reliabilität beschreibt die Zuverlässigkeit eines Verfahrens gegenüber variierenden äußeren Bedingungen. Nach Krippendorff (1980, S. 215) umfasst die Reliabilität die Aspekte Stabilität (Zuverlässigkeit mit verschiedenen Zeitpunkten, Test-Retest-Reliabilität), Reproduzierbarkeit (Zuverlässigkeit bei verschiedenen Durchführenden, Interrater-Reliabilität) und Präzision (Zuverlässigkeit im Vergleich zu anderen Verfahren, Konvergenz). Da zum einen die Einschätzung der Gütekriterien für das Verfahren des Concept Mappings häufig unzureichend ist (Graf, 2014) und es zum anderen noch kein anderes Verfahren zur Visualisierung der speziellen Struktur in schriftsprachlichen Erklärungen vor einem modellorientierten Hintergrund gibt, ist die Prüfung der Zuverlässigkeit im Vergleich mit einem anderen Verfahren noch nicht möglich. Die Stabilität kann im Prinzip durch Wiederholung des Verfahrens (Test-Retest) an der gleichen Stichprobe zu einem späteren Zeitpunkt eingeschätzt werden (Krippendorff, 1980). Eine solche Wiederholung ist im Rahmen dieser Arbeit jedoch ebenfalls nicht möglich, da das Verfahren an der gleichen Stichprobe zu zwei Zeitpunkten, die aufgrund ökonomischer Gesichtspunkte nur begrenzt weit auseinander liegen können, von einem Durchführenden nicht vollständig unabhängig realisiert werden kann, denn sowohl die Kodierung bestimmter Elemente als auch die Identifikation bestimmter Beziehungen sowie die fachliche Bewertung bestimmter Aussagen prägen sich in das Gedächtnis ein, zumal diese Strukturen im weiteren Verlauf mehrfach analysiert werden und dem Forschenden somit ständig präsent sind. Deshalb wird für das Verfahren vor allem der Aspekt der Reproduzierbarkeit in Form der Beurteilerübereinstimmung eingeschätzt. Diese Beurteilerübereinstimmung ist zugleich eine Einschätzung der Objektivität, da hiermit die Unabhängigkeit vom Durchführenden untersucht wird.

Aussagen über die Validität betreffen die Gültigkeit des Verfahrens (Bortz & Döring, 2002) und geben an, ob das Verfahren tatsächlich das leistet, was es zu leisten vorgibt (Krippendorff, 1980). Die Validität wird

durch eine Einschätzung der Kategorienbeschreibung von einem Experten bewertet, wodurch vor allem Aussagen über die semantische Gültigkeit gemacht werden können (Mayring, 2010). In den Ergebnissen der Vorstudie werden zwei weitere Argumente für die Validität des Verfahrens vorgestellt.

Da das Verfahren im Prinzip aus drei Hauptschritten besteht (die ersten beiden Schritte des Kodiermanuals werden zusammen betrachtet), werden im Folgenden die Kriterien zur Einschätzung der Gütekriterien für die Schritte (1) Identifikation und Kategorisierung der Elemente, (2) Identifikation der Beziehungen und (3) Bewertung der Propositionen nacheinander dargestellt.

D.1 IDENTIFIKATION UND KATEGORISIERUNG DER ELEMENTE

Für eine Einschätzung der Schritte zur Identifikation und Kategorisierung der Elemente wird die zufallsbereinigte Beurteilerübereinstimmung durch das Maß Cohens κ ausgedrückt (Wirtz & Caspar, 2002). Dabei entsprechen die Codes 1, 2, 3, 4 den Kategorien 1 - nicht relevantes Element des Phänomens, 2 - relevantes Element des Phänomens, 3 - relevantes Element der Theorie, 4 - nicht relevantes Element der Theorie. Für den Fall, dass Elemente von einem Kodierer nicht identifiziert wurden, wird die Kategorie 0 eingeführt.

Eine Übereinstimmung beider Kodierer für die Kategorie 0 ist durch das Verfahren ausgeschlossen, da hierfür eine den beiden Kodierern übergeordnete Instanz ein Element identifizieren müsste, welches beide Kodierer nicht kodiert haben. Diese Instanz gibt es jedoch in dem hier angewendeten Verfahren nicht. Daraus folgt, dass zwar keine Übereinstimmungen in der Kategorie 0 gefunden werden können, wohl jedoch Abweichungen. Die Kategorie 0 trägt also lediglich zu einer Verschlechterung des Wertes für Cohens κ bei, nicht jedoch zu dessen Verbesserung. Dadurch unterschätzt das Maß Cohens κ die Güte des angewendeten Verfahrens systematisch. Bei einer Häufung von Abweichungen in der Kategorie 0 sind daher mögliche Ursachen genauer zu betrachten und entsprechende Konsequenzen bspw. durch die Verfeinerung des Kodiermanuals zu ziehen. Darüber hinaus limitiert die Unmöglichkeit einer Kodierung eines Elementes mit 0 durch beide Kodierer die Einschätzung der Vollständigkeit der Kodierung und somit der Concept Map. Es bleibt hiernach offen, ob die Concept Map den fachlichen Inhalt einer Erklärung vollständig abbildet oder ob Teilstrukturen fehlen, also gewissermaßen beide Kodierer bzw. das Kodiermanual einen 'blinden Fleck' haben. Diese Limitierung wird jedoch teilweise dadurch aufgehoben, dass beim Identifizieren der Beziehungen im nächsten Schritt indirekt erneut nach Quellen- und Ziel-Elementen für diese Beziehungen gesucht wird. Wenn es beispielsweise ein Quellen-Element gibt, das in Beziehung zu einem nicht identifizierten Ziel-Element steht, so kann davon ausgegangen werden, dass das Fehlen dieses Elements in dem Schritt mindestens einem Kodierer auffallen würde, außer es handelt sich um eine reflexive Beziehung. Theoretisch ist es allerdings möglich, dass für beide Kodierer genau solche Beziehungen, die ein nichtkodiertes Element mit einem anderen Elementen verbinden, einen solchen blinden Fleck darstellen. Die Existenz einer derartigen systematischen Fehleinschätzung erscheint jedoch nicht plausibel. Das heißt, dass für den Fall der versehentlichen Nichtkodierung eines Elements durch beide Kodierer nur noch solche Elemente übrig bleiben, die allein zu sich selbst in Beziehung stehen. Die Häufigkeit und Relevanz solcher Elemente für eine Erklärung kann jedoch vernachlässigt werden.

Die semantische Gültigkeit als Aspekt der Validität kann durch die Einschätzung eines unabhängigen Experten auf Basis der Kriterien und Ankerbeispiele aus dem Kodiermanual überprüft werden (Mayring, 2010).

D.2 IDENTIFIKATION DER BEZIEHUNGEN

Beziehungen in kategorienorientierten Concept Maps können in verschiedenen Formen auftreten. Sie können mehrere Quellenelemente mit mehreren Zielelementen verbinden und auch Beziehungen mit anderen Beziehungen (bzw. Elementen) verbinden (vgl. Abschnitt 2.3). Die Beurteilerübereinstimmung prüft, ob zwei Beurteiler jeweils die Beziehung identifiziert haben. Zwei Beziehungen sollen dabei als gleich angesehen wer-

den, wenn durch sie die gleichen Aussagen getroffen werden, also die gleichen Elemente auf inhaltlich gleiche Weise in Verbindung miteinander gesetzt werden. Dabei kann der genaue Wortlaut jedoch etwas variieren. Zur Einschätzung der Übereinstimmung in der Identifikation einer Beziehung muss also die gesamte, durch die Beziehung entstehende Aussage für beide Beurteiler geprüft werden. Die verschiedenen Formen von Beziehungen haben zur Folge, dass es neben der Identität zweier Aussagen auch die Möglichkeit gibt, dass die von einem Beurteiler gefundene Aussage in einer von dem anderen Beurteiler gefundenen Aussagen enthalten ist, ohne dass die Umkehrung zutrifft. Ein Beispiel: Beurteiler J identifiziert in einer Textstelle die Aussage "Lichtstrahl wird zum Lot gebrochen", während Beurteiler K in der gleichen Textstelle nur die Aussage "Lichtstrahl wird gebrochen" findet. Dann ist die von K gefundene Aussage ein Teil von J gefundenen Aussage. Die Umkehrung trifft jedoch nicht zu. Damit sind beide Aussagen nicht identisch. Würde man jedoch diese beiden Aussagen nur als Nichtübereinstimmung bewerten, dann wäre dadurch die wahre (teilweise) Übereinstimmung unterschätzt. Neben der Identität zweier Aussagen müssen also auch solche Fälle berücksichtigt werden, in denen die von einem Beurteiler gefundene Aussage in der Menge aller vom anderen Beurteiler gefundenen Aussagen enthalten ist, aber keine dieser Aussagen identisch zur Aussage des ersten Beurteilers ist.

Formal können diese Fälle für zwei Beobachter J und K sowie deren Aussagen p_j und p_k aus den Mengen aller ihrer Aussagen P_J und P_K wie folgt formuliert werden:

1. Es gibt eine Aussage p_j in der Menge der Aussagen P_J eines Beurteilers J , in der die betrachtete Aussage p_k aus der Menge aller Aussagen P_K eines anderen Beurteilers K enthalten ist. Eine Aussage p_k ist dann in der Aussage p_j enthalten, wenn sowohl die Quelle als auch das Ziel der Beziehung in p_k in der Menge der Quellen bzw. der Ziele der Beziehung in p_j enthalten ist und die Beziehung p_k diese Quelle(n) und Ziel(e) inhaltlich ähnlich miteinander verbindet.
2. Es gibt *keine* Aussage p_j in der Menge der Aussagen P_J eines Beurteilers J , in der die betrachtete Aussage p_k aus der Menge aller Aussagen P_K eines anderen Beurteilers K in der unter 1. beschriebenen Weise enthalten ist.

Für den ersten Fall erhält die Aussage p_k einen Punkt, für den zweiten Fall nicht. Daraus ergeben sich mehrere Möglichkeiten. Wenn die Aussage p_j des Beurteilers J in der Aussage p_k des Beurteilers K enthalten ist und gleichzeitig die Aussage p_k in der Aussage p_j , dann erhalten beide Aussagen jeweils einen Punkt. Wenn die Aussage p_j des Beurteilers J in der Aussage p_k des Beurteilers K enthalten ist, ohne dass die Aussage p_k in irgend einer anderen Aussage des Beurteilers J enthalten ist, dann bekommt die Aussage p_j einen Punkt, die Aussage p_k nicht.

Für jeden Beurteiler werden die Aussagen gezählt, die in der Menge aller Aussagen des jeweils anderen Beurteilers gefunden werden können. Diese Anzahl wird durch die Gesamtzahl der getroffenen Aussagen dividiert. Daraus ergibt sich eine relative bzw. prozentuale Beurteilerübereinstimmung für die Identifikationen von Beziehungen in einer Erklärung. Die Aussage eines Beurteilers kann mehrere Aussagen eines anderen Beurteilers enthalten. Dadurch kann die Anzahl der Aussagen eines Beurteilers, die in den Aussagen des jeweils anderen Beurteilers enthalten sind, größer sein, als die Gesamtzahl der Aussagen des anderen Beurteilers.

Eine relative Übereinstimmung von 1.0 bedeutet, dass alle Aussagen beider Beurteiler in den Aussagen des jeweils anderen Beurteilers enthalten sind. In diesem Fall müssen alle Aussagen identisch sein. Eine Übereinstimmung von 0.0 bedeutet, dass keine Aussage eines Beurteilers in den Aussagen des jeweils anderen Beurteilers enthalten sind. Eine Übereinstimmung von 0.5 heißt, dass die Hälfte aller Aussagen beider Beurteiler zusammen in Aussagen des jeweils anderen Beurteilers enthalten sind. Haben beide Kodierer die gleiche Anzahl an Aussagen identifiziert, kann eine Übereinstimmung von 0.5 im Extremfall bedeuten, dass alle Aussagen eines Kodierers in den Aussagen des zweiten Kodierers enthalten sind, umgekehrt jedoch keine Aussage des zweiten Kodierers in den Aussagen des ersten. Das bedeutet, dass für jede Aussage

des ersten Beurteilers gilt, dass es eine Aussage des zweiten Beurteilers gibt, die die gleichen Elemente und Beziehungen enthält, aber dass diese Propositionen des zweiten Kodierers weitere Elemente und/oder Beziehungen enthalten, die nicht in den entsprechenden Aussagen des ersten Beurteilers enthalten sind. Von diesem Extremfall ist im Allgemeinen jedoch nicht auszugehen.

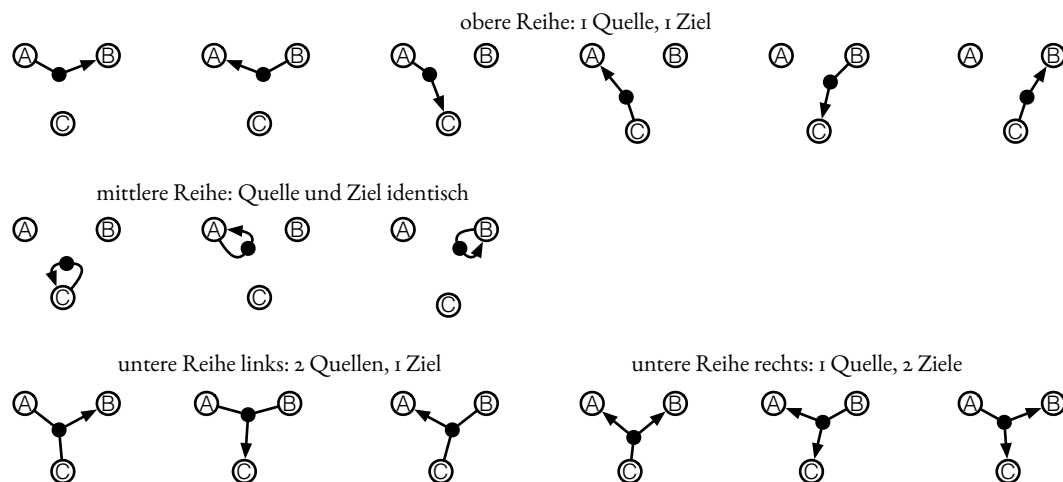


Abbildung D.1: Formale Darstellung möglicher Beziehungen zwischen drei Elementen A, B und C

Zur Einschätzung der Beurteilerübereinstimmung dieser Art fehlen etablierte Kennwerte. Die oben beschriebene relative Übereinstimmung soll als Kennwert genügen. Da eine Beziehung potenziell beliebig viele Elemente miteinander verbinden kann, gibt es bereits bei drei Elementen 15 Möglichkeiten, diese durch eine Beziehung mit mindestens einem Quellenelement und mindestens einem Zielelement (wobei Quelle und Ziel identisch sein können) zufällig miteinander zu verbinden (Abbildung D.1). Bei einer kCM bestehend aus vier Elementen sind es bereits 56 Möglichkeiten. Das heißt, dass zwei Beurteiler mit einer Wahrscheinlichkeit von $1/56$ (1,79%) die gleichen Elemente miteinander in Verbindung setzen. In kCMs werden jedoch in der Regel mehr als nur vier Elemente erwartet. Überdies ist dabei noch nicht berücksichtigt, dass eine Beziehung noch einen semantischen Inhalt hat. Die Aussage "A ist größer als B" verbindet die gleichen Elemente wie die Aussage "A ist kleiner als B". Beide Aussagen behaupten aber aufgrund ihrer Bedeutung nicht das gleiche. Eine zufällige Übereinstimmung in der Identifikation einer Beziehung kann somit als sehr unwahrscheinlich zurückgewiesen werden. Die Einschätzung des Wertes für die relative Übereinstimmung erfolgt damit wie im Fall der Einschätzung des zufallsbereinigten Maßes Cohens κ nach Landis und Koch (1977).

Die Validität des Schritts der Identifikation von Beziehungen schätzt dessen Gültigkeit ein, also ob dadurch tatsächlich Beziehungen zwischen Elementen aufgedeckt werden können. Die Beziehungen werden in kCMs durch Prädikate, adverbale Bestimmungen und Attribuierungen auf Basis des Textes ausgedrückt. Die grammatische Funktion dieser Sprachbestandteile besteht darin, Nomen (Objekte, Subjekte) in Beziehung zu setzen (Pittner, 2016). Es ist also plausibel, anzunehmen, dass durch diesen Schritt tatsächlich Beziehungen aufgedeckt werden.

D.3 BEWERTUNG DER AUSSAGEN

Die Kriterien zur Bewertung von Aussagen als fachlich inkorrekt werden im Kodiermanual ausgeführt. Die Bewertung der Aussagen erfolgt dichotom als fachlich korrekt oder fachlich inkorrekt. Die Beurteilerübereinstimmung wird durch Cohens κ ausgedrückt. Da bei wenigen Kategorien in Kontingenztafeln (bei dichotomen Variablen: Vierfeldertafeln) Cohens κ anfällig gegen unsymmetrische Verteilung der Randsummen ist, kann durch den *phi*-Koeffizienten zusätzlich die Korrelation der Urteile beider Rater über-

prüft werden und durch die Angabe eines χ^2 -Wertes dieser Zusammenhang auf Überzufälligkeit getestet werden. Bei Stichproben mit $n < 60$ sollte dabei statt des einfachen χ^2 -Wertes der Fisher-Yates-korrigierte Wert χ^2_{cor} angegeben werden (Wirtz & Caspar, 2002). Die kritischen χ^2 -Werte können aus entsprechenden Tabellen (z.B. Wirtz & Caspar, 2002, S. 266) entnommen werden.

Tabelle D.1: Kontingenztafel für die fachliche Bewertung

CODER 1 \ CODER 2	0	1	Σ Coder 1
0	a	b	$A = a + b$
1	c	d	$B = c + d$
Σ Coder 2	$C = a + c$	$D = b + d$	N

Dabei ergeben sich der ϕ -Koeffizient sowie der χ^2 - bzw. Fisher-Yates-korrigierte Wert χ^2_{cor} aus nachfolgender exemplarischer Kontingenztafel für die dichotome Kodierung durch zwei Rater wie folgt:

$$\phi = \frac{ad - bc}{\sqrt{A \cdot B \cdot C \cdot D}}$$

$$\chi^2 = \frac{N(ad - bc)^2}{A \cdot B \cdot C \cdot D}$$

$$\chi^2_{cor} = \frac{N(|ad - bc| - \frac{N}{2})^2}{A \cdot B \cdot C \cdot D}$$

Für die Einschätzung des Verfahrens in der Hauptstudie wird von einer Stichprobengröße $n > 60$ ausgegangen, sodass diese korrigierte Einschätzung nicht notwendig ist. Deshalb wird dort nur der Wert Cohens κ sowie der Vertrauensbereich von κ angegeben.

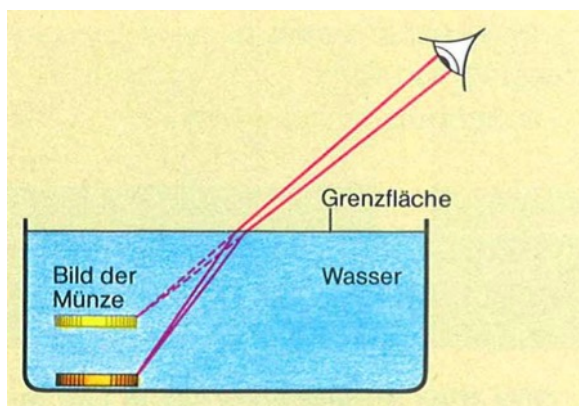
Die semantische Gültigkeit als Aspekt der Validität kann wie bei der Beurteilung der Güte der Identifikation und Kategorisierung der Elemente durch die Einschätzung eines unabhängigen Experten auf Basis der Kriterien und Ankerbeispiele aus dem Kodiermanual überprüft werden (Mayring, 2010).

E MATERIALIEN DER VORSTUDIE

E.1 ERKLÄRUNGEN

bi-B: Hebung

- 1 Sehen wir uns ein Lichtbündel¹ an, das¹ von einem Gegenstand² unter Wasser³, z.B. von einer Münze², aus-
2 geht und in unser⁴ Auge⁴ gelangt: Wenn das Lichtbündel¹ schräg auf die Wasseroberfläche⁵ fällt, wird es¹ an
3 der Grenzfläche⁶ Wasser³-Luft⁷ gebrochen. Unser⁴ Gehirn⁴ geht aber aufgrund der Erfahrung⁸ davon aus,
4 daß sich Licht⁹ geradlinig ausbreitet. Es⁴ verlegt deshalb den Ausgangspunkt¹⁰ des Lichtbündels¹ an eine
5 andere Stelle¹¹; wir⁴ nehmen den Gegenstandspunkt¹² dort wahr, wo sich die rückwärts verlängerten Rand-
6 strahlen¹³ des gebrochenen Lichtbündels¹⁴ schneiden. Wir⁴ sehen ein virtuelles Bild¹⁵ des Gegenstandes²,
7 der Gegenstand² ist scheinbar angehoben.'



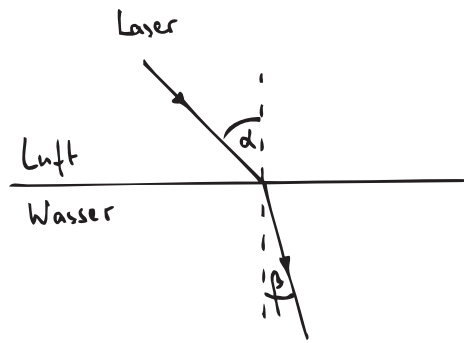
Skizze des Probanden bi (Boysen1991) zum Phänomen der gehobenen Münze

eo3-A: Laserstrahl

- 1 Der Laserstrahl (1) ist von oben links nach unten rechts auf die Wasseroberfläche (2) im Aquarium (3)
2 gerichtet. An dieser Grenzfläche (4) ändert sich die Phasengeschwindigkeit (5) des Lichts (6) durch die
3 Überlagerung (7) der Primärwellen (8) und materialabhängigen Sekundärwellen (9) und damit auch die
4 Ausbreitungsrichtung (10). Der Laserstrahl (1) als enges Lichtbündel (11) folgt diesem Prinzip (12). Diese
5 Änderung (13) der Ausbreitungsrichtung (10) wird als Brechung (14) bezeichnet. Aus dem Verhältnis (15)
6 der Sinusse (16, 17) der Winkel (18, 19) zwischen ursprünglichem (20, Strahl) bzw. gebrochenem Strahl (21)
7 und dem Lot (22) zur Grenzfläche (4) kann nach dem Brechungsgesetz von Snellius (23) die Brechzahl (24)
8 dieses Übergangs (25) bestimmt werden.

eo3-A2: Laserstrahl

- 1 Man (1) sieht senkrecht durch die Glaswand (2) eines Aquariums (3). Das Aquarium (3) ist mit Wasser (4)
2 gefüllt. Auf die Oberfläche (5) des Wassers (4) ist von schräg oben ein Laserstrahl (6) gerichtet. An der
3 Oberfläche (5) wird der Laserstrahl (6) nach unten abgelenkt. Aus der Stärke (7) des Knicks (8) kann nach
4 dem Brechungsgesetz (9) die Brechzahl (10) dieses Übergangs (11) bestimmt werden. Der Laserstrahl (6) ist

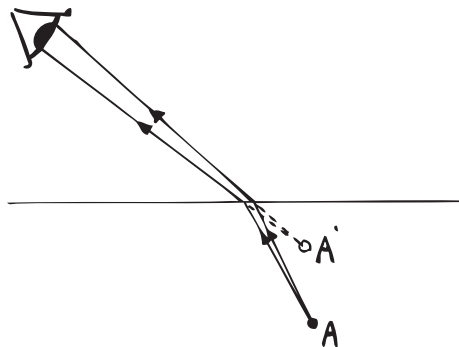


Skizze des Probanden eo3 zum Foto A (Laserstrahl)

- 5 für den Beobachter (1) sichtbar, weil er (6) an Partikeln (12, 13) in der Luft (14) und im Wasser (4) in alle
 6 Richtungen (15) gestreut wird. Auf dem Weg (16) zum Beobachter (1) trifft das in der Luft (14) gestreute
 7 Licht (17) auf keine Grenzfläche (18) (das Glas (2) kann vernachlässigt werden). Es (17) erfährt daher kei-
 8 ne Richtungsänderung (19). Das im Wasser (4) gestreute gestreute Licht (20) trifft nahezu senkrecht auf die
 9 Grenzfläche (21) Wasser (4)-Luft (14) und erfährt ebenfalls keine Richtungsänderung (19). Dadurch sieht der
 10 Beobachter (1) das Bild (22) des Teils (23) des Laserstrahls (6) unter Wasser (4) vor dem Laser (6) selbst. Des-
 11 halb erscheint der geknickte Laser (26) dem Beobachter (1) in dieser Perspektive (24) in seiner tatsächlichen
 12 Form (25).

eo3-B: Münzen

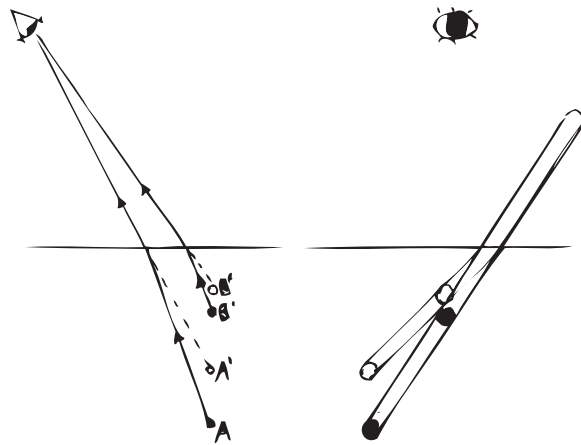
- 1 Man (1) schaut in diesem Bild (2) schräg von oben auf zwei Aquarien (3, 4). Im linken Aquarium (3) liegt eine
 2 Münze (5) am Boden (6) des Aquariums (3). Wir (1) sehen nur den hinteren Teil (7) der Münze (5), weil der
 3 Lichtweg (8) vom vorderen Teil (9) zu uns (1) durch die Wand (10) des Aquarium (3) versperrt ist. Das rechte
 4 Aquarium (4) ist mit Wasser (11) gefüllt. Auch hier liegt eine Münze (12) am Boden (13). Die Lichtstrahlen
 5 (14), die uns (1) von der Münze (12) erreichen, wurden jedoch an der Oberfläche (15) des Wassers (11) gemäß
 6 dem Brechungsgesetz (16) "vom Lot (17) weg geknickt", also hin zu uns (1) als Betrachter (1). Diesen Knick
 7 (18) können wir (1) jedoch nicht rekonstruieren. Stattdessen sehen wir (1) ein Bild (3) der Münze (12) dort, wo
 8 sich die rückwärtigen Verlängerungen (20) der geknickten Lichtstrahlen (21) treffen, also ungefähr über dem
 9 tatsächlichen Ort (22) der Münze (12). Die Münze (12) sowie der Gefäßboden (13) erscheinen uns (1) daher
 10 gehoben, sodass für das Licht (23) von der Münze (12) zu uns (1) die vordere Wand (24) des Aquariums (4)
 11 nun nicht mehr im Weg (25) ist.



Skizze des Probanden eo3 zum Foto B (Münzen)

eo3-C: Bleistift

- 1 Man (1) schaut schräg von oben auf zwei Aquarien (2,3) mit je einem Stift (4,5) an der Rückwand (6,7).
 2 Im linken Aquarium (2) können die Lichtstrahlen (8) vom Stift (4) direkt in das Auge des Betrachters (1)
 3 gelangen. Ohne einen Medienübergang (11) zwischen Stift (4) und Beobachter (1) ist das Bild (10) des Stiftes
 4 (4) mit dem Stift (4) selbst identisch. Im rechten Aquarium (3) werden sie (9) beim Übergang (11) von
 5 Wasser (12) zu Luft (13) gemäß dem Brechungsgesetz (14) vom Lot (15) weggeknickt. Das Auge (1) kann
 6 diesen Vorgang (16) jedoch nicht rekonstruieren. Es (1) sieht daher ein Bild (17) aller Punkte (18) des Stiftes
 7 (5) unter Wasser (12) und des Gefäßbodens (19) im Schnittpunkt (20) der rückwärtigen Verlängerung (21) der
 8 genickten Lichtstrahlen (22), also gegenüber ihrer (18) tatsächlichen Position (23) etwas gehoben. Dadurch
 9 erscheint dem Betrachter (1) der Teil (24) des Stiftes (5), der (24) sich unter Wasser (12) befindet, nach oben
 10 geknickt.



Skizze des Probanden eo3 zum Foto C (Bleistift)

sor-A: Laserstrahl

- 1 Also auf Bild A sehe ich ein Becken welches zur Hälfte mit Wasser gefüllt ist und in das ein Strahl geleuchtet
 2 wird anscheinend. Sieht zumindest so aus und der Strahl wird in einem stumpfen Winkel gebrochen beim
 3 Auftreffen auf die Wasseroberfläche.
 4 ja / das ist schon lange her / wie schon gesagt / am einfachsten ist wohl Bild A mit dem Laserstrahl / und
 5 ja / Teilchenphysikalisch kann ich es vielleicht erklären / das war Reflexion / ich habe gerade Reflexion mit
 6 der Brechung vertauscht und da war ja / Totalreflexion abhängig von den Teilchen / beziehungsweise von
 7 den Ebenen / ja es ist sehr schwierig / ja es tut mir leid / aber ich kann nur sagen es findet Brechung statt
 8 aufgrund der unterschiedlichen optischen Dichten zwischen Wasser und Luft und / die Brechung erfolgt
 9 zum Lot hin / so gesehen /

SEMANTISCHE EINHEITEN

1. In Bild A sieht man (1) ein zur Hälfte (2) mit Wasser (3) gefülltes Becken (4).
2. Ein Strahl (5) leuchtet in das Becken (4).
3. Der Strahl (5) wird beim Auftreffen (6) auf die Wasseroberfläche (7) in einem stumpfen Winkel (8) gebrochen.
4. Es findet aufgrund der unterschiedlichen optischen Dichten (9, 10) von Luft (11) und Wasser (3) eine Brechung (12) statt.

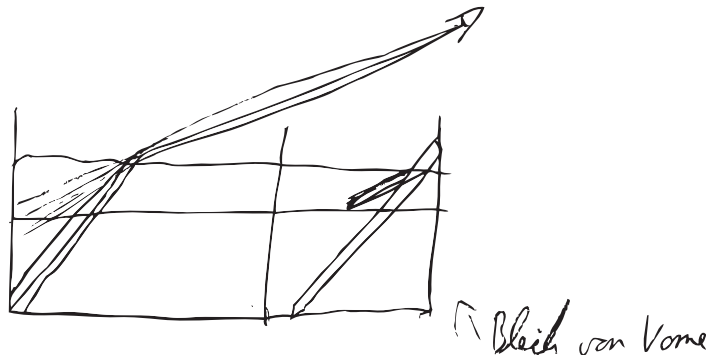
5. Die Brechung (12) erfolgt zum Lot (13) hin.

so1-C: Bleistift

- 1 ja / Bild C das Bild mit den beiden Stiften / da habe ich jetzt ehrlich gesagt keine 100 prozentige Ahnung / das
- 2 würde ich jetzt in etwa so erklären wie bei Bild D / dass die Brechung halt dafür sorgt, dass man relativ einen
- 3 Knick wahrnimmt in dem Bild was man sieht / es könnte auch daher kommen dass wenn man draufschaut,
- 4 jetzt zumindest in Verknüpfung mit Bild B wenn ich mir das so anschau / dass das Becken dann als flacher
- 5 erscheint als es Tatsache ist. dass die Tiefe der beiden Becken ist das selbe, aber wenn man beide Becken jetzt
- 6 mit Wasser gefüllt wurde genauer hinschaut erscheint es jetzt als wenn die Tiefe eine geringere wäre. halb
- 7 so tief wenn ich jetzt schätzen müsste. als bei dem das nicht mit Wasser gefüllt wurde und dadurch wird
- 8 halt auch die Neigung des Stifts, welche auf das Becken betrachtet immer noch das Selbe ist gestaucht / und
- 9 erscheint so als ob es einen stumpfen Winkel hätte zum restlichen Stück des Stiftes, das aus dem Becken
- 10 rausschaut in der Luft. ja das wäre eigentlich alles was ich zu Bild C sagen würde

SEMANTISCHE EINHEITEN

1. Durch die Brechung (1) nimmt man (2) einen Knick (3) wahr.
2. Das Becken (6) erscheint flacher als es (6) ist.
3. Die Tiefe (4, 5) beider Becken (6, 7) ist dieselbe.
4. Die Tiefe (4) des Beckens (6) mit Wasser (8) erscheint geringer.
5. (Die Tiefe (4) des Beckens (6) erscheint) etwa halb so tief.
6. Dadurch wirkt die Neigung (9) des Stiftes (10) gestaucht.
7. Zwischen dem Stiftteil (11) über Wasser (8) und dem Teil (12) unter Wasser (8) liegt ein stumpfer Winkel (13).

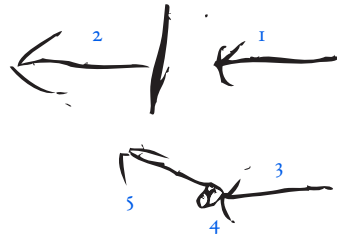


Skizze des Probanden so1 zum Foto C (Bleistift)

so4-A: Laserstrahl

- 1 naja das / Luft / beziehungsweise Licht ist ja im Endeffekt auch nur eine Welle, die durch die Luft an sich
- 2 nicht großartig beeinflusst wird. allerdings ist Wasser natürlich ein anderes Material und die / weiß gar nicht
- 3 ob das dann auch auf die Atome dann zurückzuführen ist, bricht es, wird das Licht anders wiedergegeben
- 4 in dem / es auf die / weiß gar nicht / doch auf die / ich weiß jetzt nicht mehr ganz ob es das war oder eher
- 5 auf andere Strahlen zurückzuführen ist, aber am ende wenn es dann auf die Wasseratome trifft, dann anders
- 6 gebrochen wird als wenn es einfach nur durch die Luft geht

7 ja gut, ich kann auch ne Skizze machen, also wenn hier die Lichtstrahlen hätte, sonst wenn man durch
 8 die Luft geht, gehts einfach so weiter durch, wenn wir hier ne Luftwand hätte, aber da hier jetzt Wasser ist,
 9 son als Wasser bezeichnen würde, so als H_2O , das dadurch auftritt anders abprallt, so meine Beschreibung
 10 dann würde das ja, der Laser ist ja im Endeffekt auch nur ne Welle die somit dann ja auch wiederum
 11 genauso wie Licht gebrochen wird. somit müsste es dann / ja gut, fast ein doppelter Effekt / ja gut / im
 12 Endeffekt ist das dann wirklich wieder das gleiche System mit der Lichtbrechung / ja Laser sind auch mein
 13 ich Wellen / wenn ich mich jetzt nicht ganz blöd anstelle



1. Lichtwelle (in Luft)
2. Lichtwelle (nach Durchgang durch Luft)
3. Lichtwelle (vor Stoß mit Wasser)
4. Wasseratom
5. Lichtwelle (nach Stoß mit Wasser)

Skizze des Studierenden so4 zum Bild A

SEMANTISCHE EINHEITEN

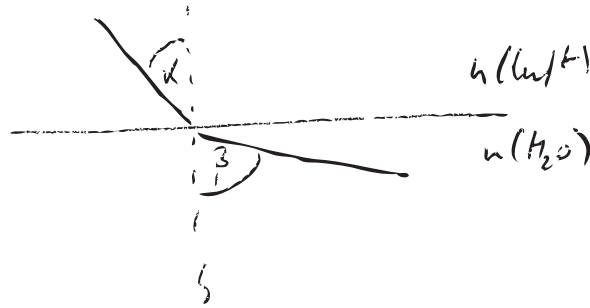
1. Licht (1) ist eine Welle (2).
2. Eine Lichtwelle (3) wird durch Luft (4) nicht beeinflusst.
3. Wasser (5) ist ein anderes Material (6) als Luft (4).
4. Das Licht (1) bricht im Wasser (5).
5. Durch die Wasseratome (7) wird Licht (1) anders gebrochen als nur in Luft (4).
6. Durch die Luft (4) gehen Lichtstrahlen (8) [Abbildung ?? : 2] durch.
7. Am Wasser (5) prallt das Licht (1) anders ab.
8. Der Laser (9) ist auch eine Welle (2).
9. Der Laser (9) wird wie Licht (1) gebrochen.

so6-B: Münzen

- 1 Der linke Behälter (1) ist leer. Dadurch wird das Licht bzw. die einfallenden Lichtstrahlen (2) bis zum Boden
- 2 (3) hin nicht gebrochen und erst dort reflektiert. Dadurch erscheint die Box (1) sehr hell zu sein. Der rechte
- 3 Behälter (4) ist zum Teil (5) mit Wasser (6) gefüllt. Das einfallende Licht (2) wird an der Wasseroberfläche (7)
- 4 zu einem gewissen Anteil (8) wie bei der linken Box (1) reflektiert, zum anderen gebrochen, sodass der Teil
- 5 (5) des Behälters (4), der mit Wasser (6) gefüllt ist, zwar nicht komplett dunkel, jedoch wesentlich dunkler
- 6 erscheint als der ungefüllte Behälter (1) links.
- 7 Links wird der einfallende Lichtstrahl (2) vollständig reflektiert, sodass einfallender Lichtstrahl (2) gleich
- 8 reflektierter Lichtstrahl (9) ist. Rechts wird nur ein Teil (8) des einfallenden Lichts (2) reflektiert, ein anderer
- 9 Teil (10) wird gebrochen, sodass einfallender Lichtstrahl (2) gleich gebrochener Strahl (11) plus reflektierter
- 10 Strahl (9) ist.

so7-C: Bleistift

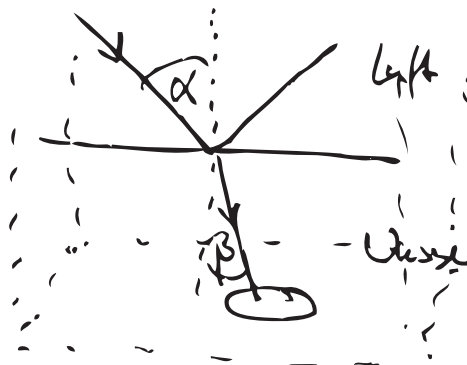
Der Bleistift (1) erscheint "gebrochen" bzw. abgelenkt. Durch den anderen Brechungsindex von Wasser (2) ($n_{\text{Wasser}} (2) = 1,33$, $n_{\text{Luft}} (3) = 1$), wird Licht (4) zum Lot (5) hin gebrochen. Dadurch sieht es so aus als würde der Bleistift (1) nach oben abknicken.



Skizze des Probanden so7 zum Foto C (Bleistift)

so9-B: Münzen

- 1 Zu sehen sind zwei Becken (1,2). Eines (1) leer bis auf ein halbrundes Objekt (Münze) (3), welches (3) nur
- 2 halb zu sehen ist, da es (3) so im Inneren (4) positioniert wurde, dass die Zwischenwand (5) den Blick (6)
- 3 versperrt.
- 4 Im Becken (2) daneben befindet sich nicht nur die Münze (11) (Vermutung: an der selben Stelle (7))
- 5 sondern auch Wasser (8) bis zu einer gewissen Höhe (9). Durch das Wasser (8) kann man (10) nun aber die
- 6 Münze (11) ganz erkennen, da sie (11) scheinbar weiter von der Wand (12) entfernt ist.
- 7 Die optische Lichtbrechung (13) spielt hier eine Rolle, da beim Eintritt (14) in das dichtere Medium (15)
- 8 (Wasser (8)) das Licht (16) in einem anderen Winkel (17) getroffen wird, als es (16) auf die Oberfläche (18)
- 9 trifft. Durch diese Brechung (13) wirkt es, als wären Dinge (19) an einem anderen Ort (20), als sie (19) wirklich
- 10 sind.



Skizze des Studierenden So9 zum Bild B

E.2 KODIERUNGEN

bI-B: Hebung

Kodierung der Elemente und Beziehungen für bI-B

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Lichtbündel	3	e1	4	hat	8	1
2	Münze	2	e2	1	hat	10	1
3	Wasser	2	e3	14	hat	13	1
4	Beobachter	2	e4	2	hat	15	1
5	Wasseroberfläche	2	e5	1	geht aus von	2	1
6	Grenzfläche	3	e6	2	(ist) unter	3	1
7	Luft	2	e7	1	gelangt in / zu	4	1
8	Erfahrung	2	e8	1	fällt schräg auf	5	1
9	Licht	3	e9	1	wird gebrochen an	6	1
10	Auggangspunkt	3	e10	6	(ist zwischen ... und ...)	3, 7	1
11	andere Stelle	3	e11	9	breitet sich geradlinig aus	9	1
12	Gegenstandspunkt	3	e12	4	verlegt	10	1
13	rückwärts verlängerte Randstrahlen	3	e13	4	nimmt wahr	12	1
14	gebrochenes Lichtbündel	3	e14	13	schneiden sich	13	1
15	virtuelles Bild	3	e15	13	sieht	15	1
			e16	2	ist scheinbar angehoben	2	1
			m1	e8	(wenn) dann	e9	1
			m2	4	geht aus von	e11	1
			m3	m2	aufgrund	8	1
			m4	e12	an	11	1
			m5	m3	deshalb	m4	1
			m6	e13	dort wo	e14	1

Tabelle E.1: Betweenness für b1-B

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN		
ID	LABEL	BETWEENESS	ID	LABEL	BETWEENESS
1	Lichtbündel	0,43	e1	hat	0,04
2	Münze	0,16	e2	hat	0,06
3	Wasser	0,03	e3	hat	0,06
4	Beobachter	0,63	e4	hat	0,07
5	Wasseroberfläche	0,00	e5	geht aus von	0,11
6	Grenzfläche	0,11	e6	(ist) unter	0,04
7	Luft	0,00	e7	gelangt in / zu	0,32
8	Erfahrung	0,00	e8	fällt schräg auf	0,08
9	Licht	0,00	e9	wird gebrochen an	0,18
10	Ausgangspunkt	0,05	e10	(ist zwischen ... und ...)	0,09
11	andere Stelle	0,00	e11	breitet sich geradlinig aus	0,06
12	Gegenstandspunkt	0,00	e12	verlegt	0,16
13	rückwärts verlängerte Randstrahlen	0,11	e13	nimmt wahr	0,29
14	gebrochenes Lichtbündel	0,00	e14	schneiden sich	0,16
15	virtuelles Bild	0,09	e15	sieht	0,11
			e16	ist scheinbar angehoben	0,00
			m1	(wenn) dann	0,01
			m2	geht aus von	0,17
			m3	aufgrund	0,04
			m4	an	0,09
			m5	deshalb	0,01
			m6	dort wo	0,20

eo3-A: Laserstrahl

Kodierung der Elemente und Beziehungen für eo3-A

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Laserstrahl	2	e1	1	ist v.o.l.n.u.r. gerichtet auf	2	1
2	Wasseroberfläche	2	e2	2	(ist) im	3	1
3	Aquarium	2	e3	2	(ist)	4	1
4	Grenzfläche	3	e4	6	hat	5	1
5	Phasengeschwindigkeit	3	e5	5	ändert sich an	4	1
6	Licht	3	e6	8	haben	7	1
7	Überlagerung	3	e6	9	haben	7	1
8	Primärwellen	3	e7	1	(ist)	11	1
9	materialabhängige Sekundärwellen	3	e8	1	folgt	12	1
10	Ausbreitungsrichtung	3	e9	10	(erfährt)	13	1
11	enges Lichtbündel	3	e10	13	wird bezeichnet als	14	1
12	Prinzip	3	e11	18	hat	16	1
13	Änderung	3	e12	19	hat	17	1
14	Brechung	3	e13	16	haben	15	1
15	Verhältnis	3	e13	17	haben	15	1
16	Sinus (1)	3	e14	18	(ist) zwischen ... (und) ...	20, 22	1
17	Sinus (2)	3	e15	19	(ist) zwischen ... (und) ...	21, 22	1
18	Winkel (1)	3	e16	4	hat	22	1
19	Winkel (2)	3	e17	25	hat	24	1
20	ursprünglicher Strahl	3	e18	24	kann bestimmt werden aus	15	1
21	gebrochener Strahl	3	m1	e5	durch	e6	1
22	Lot	3	m2	m1	damit auch	e7	1
23	Brechungsgesetz von Snellius	3	m3	m2	ist	12	1
24	Brechzahl	3	m4	e18	nach	23	1
25	Übergang	3					

e03-A2: Laserstrahl

Kodierung der Elemente und Beziehungen für e03-A2

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Beobachter	2	e1	3	hat	2	1
2	Glaswand	2	e2	1	sieht senkrecht durch	2	1
3	Aquarium	2	e3	3	ist gefüllt mit	4	1
4	Wasser	2	e4	4	hat	5	1
5	Oberfläche	2	e5	6	ist v.s.o. gerichtet auf	5	1
6	Laserstrahl	2	e6	6	wird nach unten abgelenkt an	5	1
7	Stärke	2	e7	8	hat	7	1
8	Knick	2	e8	11	hat	10	1
9	Brechungsgesetz	3	e9	5	ist	11	1
10	Brechzahl	3	e10	10	kann bestimmt werden aus	7	1
11	Übergang	3	e11	6	ist sichtbar für	1	1
12	Partikeln (1)	3	e12	12	sind in	14	1
13	Partikeln (2)	3	e13	13	sind in	4	1
14	Luft	2	e14	6	wird gestreut an ... und ...	12	1
15	Richtungen	3	e14	6	wird gestreut an ... und ...	13	1
16	Weg	3	e15	17	wird gestreut in	14	1
17	Licht (1)	3	e16	17	ist auf	16	1
18	Grenzfläche (1)	3	e17	17	trifft auf keine	18	1
19	Richtungsänderung	3	e18	2	kann vernachlässigt werden	2	1
20	Licht (2)	3	e19	17	erfährt keine	19	1
21	Grenzfläche (2)	3	e20	20	wird gestreut in	4	1
22	Bild	3	e21	20	trifft senkrecht auf	21	1
23	Teil	2	e22	21	(ist) zwischen ... (und) ...	4	1
24	Perspektive	2	e22	21	(ist) zwischen ... (und) ...	14	1
25	tatsächliche Form	2	e23	20	erfährt ebenfalls keine	19	1
26	geknickter Laser	2	e24	6	hat	23	1
			e25	23	hat	22	1
			e26	1	sieht	22	1
			e27	23	(ist) unter	4	1
			e28	26	erscheint	1	1
			e29	1	(hat)	24	1
			m1	e10	nach	9	1
			m2	e14	in alle	15	1
			m3	e11	weil	m2	1
			m4	e16	zu	1	1
			m5	e17	daher	e19	1
			m6	e26	vor	6	1
			m7	e23	dadurch	m6	1
			m8	e28	in	25	1
			m9	m8	in	24	1
			m10	m6	deshalb	m9	1

e03-B: Münzen

Kodierung der Elemente und Beziehungen für e03-B

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Beobachter	2	e1	1	schaut v.s.o. auf	3	1
2	Bild	1	e2	3	hat	6	1
3	Aquarium (1)	2	e3	5	liegt an	6	1
4	Aquarium (2)	2	e4	5	hat	7	1
5	Münze (1)	2	e5	1	sieht nur	7	1
6	Boden (1)	2	e6	5	hat	9	1
7	hinterer Teil	2	e7	8	(führt) von ... zu ...	9, 1	1
8	Lichtweg	3	e8	8	ist versperrt durch	10	1
9	vorderer Teil	2	e9	3	hat	10	1
10	Wand	2	e10	4	ist gefüllt mit	11	1
11	Wasser	2	e11	12	liegt an	13	1
12	Münze (2)	2	e12	14	erreichen	1	1
13	Boden (2)	2	e13	11	hat	15	1
14	Lichtstrahlen	3	e14	14	wurden geknickt an	15	1
15	Oberfläche	2	e15	1	kann nicht rekonstruieren	18	1
16	Brechungsgesetz	3	e16	12	hat	3	1
17	Lot	3	e17	1	sieht	3	1
18	Knick	3	e18	21	haben	20	1
19	Bild	2	e19	20	treffen sich	20	1
20	rückwärtige Verlängerungen	3	e20	12	hat	22	1
21	geknickte Lichtstrahlen	3	e21	12	erscheint gehoben (dem)	1	1
22	tatsächlicher Ort	2	e22	13	erscheint gehoben (dem)	1	1
23	Licht	3	e23	25	(führt) von ... zu ...	12, 1	1
24	vordere Wand	2	e24	4	hat	24	1
25	Weg	2	e25	24	ist nicht mehr in	25	1
			e26	1	schaut v.s.o. auf	4	1
			m1	e1	in	2	1
			m2	e3	in	3	1
			m3	e5	wegen	e8	1
			m4	e11	in	4	1
			m5	e12	von	12	1
			m6	e14	weg vom	17	1
			m7	m6	gemäß	16	1
			m8	m6	also hin zu	1	1
			m9	e14	ist	18	1
			m10	e17	dort wo	e19	1
			m11	m10	(ist) ungefähr über)	22	1
			m12	m11	daher ... und ...	e21, e22	1
			m13	e23	für	23	1
			m14	m12	sodass	e25	1

Tabelle E.2: Betweenness für eo3-B

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN		
ID	LABEL	BETWEENESS	ID	LABEL	BETWEENESS
1	Beobachter	0,71	e1	schaut v,s,o, auf	0,21
2	Bild	0,00	e2	hat	0,03
3	Aquarium (1)	0,15	e3	liegt an	0,01
4	Aquarium (2)	0,12	e4	hat	0,02
5	Münze (1)	0,01	e5	sieht nur	0,11
6	Boden (1)	0,00	e6	hat	0,02
7	hinterer Teil	0,04	e7	(führt) von ... zu ...	0,11
8	Lichtweg	0,02	e8	ist versperrt durch	0,02
9	vorderer Teil	0,04	e9	hat	0,02
10	Wand	0,01	e10	ist gefüllt mit	0,04
11	Wasser	0,02	e11	liegt an	0,02
12	Münze (2)	0,10	e12	erreichen	0,08
13	Boden (2)	0,01	e13	hat	0,01
14	Lichtstrahlen	0,04	e14	wurden geknickt an	0,06
15	Oberfläche	0,03	e15	kann nicht rekonstruieren	0,05
16	Brechungsgesetz	0,00	e16	hat	0,01
17	Lot	0,00	e17	sieht	0,16
18	Knick	0,03	e18	haben	0,03
19	Bild	0,01	e19	treffen sich	0,09
20	rückwärtige Verlängerungen	0,06	e20	hat	0,02
21	geknickte Lichtstrahlen	0,00	e21	erscheint gehoben (dem)	0,06
22	tatsächlicher Ort	0,01	e22	erscheint gehoben (dem)	0,06
23	Licht	0,00	e23	(führt) von ... zu ...	0,15
24	vordere Wand	0,01	e24	hat	0,02
25	Weg	0,04	e25	ist nicht mehr in	0,03
			e26	schaut v,s,o, auf	0,12
			m1	in	0,03
			m2	in	0,03
			m3	wegen	0,02
			m4	in	0,02
			m5	von	0,01
			m6	weg vom	0,12
			m7	gemäß	0,03
			m8	also hin zu	0,13
			m9	ist	0,01
			m10	dort wo	0,13
			m11	(ist) ungefähr über	0,03
			m12	daher ... und ...	0,07
			m13	für	0,03
			m14	sodass	0,01

e03-C: Bleistift

Kodierung der Elemente und Beziehungen für e03-C

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Beobachter	2	e1	1	schaut v.s.o. auf	2	1
2	Aquarium (links)	2	e2	1	schaut v.s.o. auf	3	1
3	Aquarium (rechts)	2	e3	2	(hat)	6	1
4	Stift (links)	2	e4	3	(hat)	7	1
5	Stift (rechts)	2	e5	4	(ist) an	6	1
6	Rückwand (links)	2	e6	5	(ist) an	7	1
7	Rückwand (rechts)	2	e7	8	gelangen direkt (zu)	1	1
8	Lichtstrahlen (links)	3	e8	4	hat	10	1
9	Lichtstrahlen (rechts)	3	e9	10	ist identisch mit	4	1
10	Bild (links)	3	e10	11	(ist) zwischen ... und	5,1	1
11	Übergang	3	e11	9	werden weggeknickt von	15	1
12	Wasser	2	e12	11	(ist) von ... zu ...	12, 13	1
13	Luft	2	e13	1	kann nicht rekonstruieren	16	1
14	Brechungsgesetz	3	e14	18	haben	17	1
15	Lot	3	e15	1	sieht	17	1
16	Vorgang	3	e16	5	hat	18	1
17	Bild (rechts)	3	e17	18	sind unter	12	1
18	Punkte	3	e18	19	hat	18	1
19	Gefäßboden	2	e19	22	haben	21	1
20	Schnittpunkt	3	e20	21	haben	20	1
21	rückwärtige Verlängerung	3	e21	18	haben	23	1
22	geknickte Lichtstrahlen	3	e22	5	hat	24	1
23	tatsächliche Position	2	e23	24	befindet sich unter	12	1
24	Teil	2	e24	24	erscheint nach oben geknickt dem	1	1
			m1	e7	von	4	1
			m2	m1	in	2	1
			m3	e9	ohne	e10	1
			m4	e11	gemäß	14	1
			m5	e11	bei	11	1
			m6	e11	in	3	1
			m7	e11	(ist)	16	1
			m8	e15	in	20	1
			m9	e15	also gehoben gegenüber	23	1
			m10	e13	daher	e15	1
			m11	m9	dadurch	e24	1

soi-A: Laserstrahl

Kodierung der Elemente und Beziehungen für soiA

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Beobachter	2	e1	1	sieht	4	1
2	Hälfte	2	e2	4	ist gefüllt mit	3	1
3	Wasser	2	e3	5	leuchtet in	4	1
4	Becken	2	e4	5	wird gebrochen in	8	1
5	Strahl	2	e5	9	(ist) unterschiedlich (zu)	10	1
6	Auftreffen	2	e6	11	hat	9	1
7	Wasseroberfläche	2	e7	3	hat	10	1
8	stumpfer Winkel	2	e8	12	erfolgt hin zu	13	1
9	optische Dichte (Luft)	3	m1	e2	zur	2	1
10	optische Dichte (Wasser)	3	m2	e4	bei	6	1
11	Luft	2	m3	m2	auf	7	1
12	Brechung	3	m4	e4	(ist)	12	1
13	Lot	3	m5	12	findet statt aufgrund	e5	1

soi-C: Bleistift

Kodierung der Elemente und Beziehungen für soi-C

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Brechung	3	e1	2	nimmt wahr	3	1
2	Beobachter	2	e2	6	erscheint flacher als es ist	6	1
3	Knick	2	e3	6	hat	4	1
4	Tiefe (1)	2	e4	7	hat	5	1
5	Tiefe (2)	2	e5	4	erscheint geringer (als)	5	1
6	Becken (1)	2	e6	6	(ist gefüllt) mit	8	1
7	Becken (2)	2	e7	4	erscheint etwa halb so tief (wie)	5	1
8	Wasser	2	e8	10	hat	9	1
9	Neigung	2	e9	9	erscheint gestaucht	9	1
10	Stift	2	e10	11	(ist) über	8	1
11	Stiftteil	2	e11	12	(ist) unter	8	1
12	Teil	2	e12	13	liegt zwischen ... und ...	11	1
13	stumpfer Winkel	2	e12	13	liegt zwischen ... und ...	12	1
			e13	4	ist (gleich)	5	1
			m1	e1	durch	1	0
			m2	e7	dadurch	e9	1

so4-A: Laserstrahl

Kodierung der Elemente und Beziehungen für so4-A

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Licht	3	e1	1	ist	2	1
2	Welle	3	e2	3	wird nicht beeinflusst durch	4	1
3	Lichtwelle	3	e3	5	ist	6	1
4	Luft	2	e4	5	ist anders als	4	1
5	Wasser	2	e5	1	wird anders gebrochen als nur in	4	0
6	Material	2	e6	8	gehen durch	4	1
7	Wasseratome	4	e7	1	prallt anders ab an	5	0
8	Lichtstrahlen	3	e8	9	ist auch	2	1
9	Laser	2	e9	9	wird gebrochen wie	1	1
			m1	e5	durch	7	0

so6-B: Münzen

Kodierung der Elemente und Beziehungen für so6-B

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	linker Behälter	2	e1	1	ist leer	1	1
2	einfallende Lichtstrahlen (links)	3	e2	2	wird nicht gebrochen bis zu	3	1
3	Boden	2	e3	2	wird erst reflektiert an	3	1
4	rechter Behälter	2	e4	1	erscheint sehr hell	1	1
5	Teil (i)	2	e5	4	ist gefüllt mit	6	1
6	Wasser	2	e6	12	wird reflektiert an	7	1
7	Wasseroberfläche	2	e7	12	wird zum anderen gebrochen an	7	1
8	gewisser Anteil	3	e8	5	erscheint dunkler als	1	1
9	reflektierter Lichtstrahl	3	e9	5	erscheint nicht komplett dunkel	5	1
10	anderer Teil	3	e10	2	wird links vollständig reflektiert	2	1
11	gebrochener Strahl	3	e11	2	ist gleich	9	1
12	einfallende Lichtstrahlen (rechts)	3	e12	12	hat	8	1
			e13	8	wird rechts reflektiert	8	1
			e14	10	wird gebrochen	10	1
			e15	12	hat	10	1
			e16	2	ist gleich (...) plus (...)	11	1
			e16	2	ist gleich (...) plus (...)	9	1
			m1	e1	dadurch	e2	1
			m1	e1	dadurch	e3	1
			m2	m1	dadurch	e4	1
			m3	e5	zu	5	1
			m4	e6	zu	8	1
			m5	m4	wie bei	1	1
			m6	e7	sodass	e8	1
			m7	e9	jedoch	e8	1
			m8	e10	sodass	e11	1
			m9	e13	sodass	e16	1
			m9	e14	sodass	e16	1

so7-C: Bleistift

Kodierung der Elemente und Beziehungen für so7-C

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Bleistift	2	e1	1	erscheint gebrochen bzw. (nach oben) abgeknickt	1	1
2	n-Wasser	3	e2	2	ist 1,33	2	1
3	n-Luft	3	e3	3	ist 1	3	1
4	Licht	3	e4	2	ist anders als	3	1
5	Lot	3	e5	4	wird gebrochen hin zu	5	1
			e6	1	sieht nach oben abgeknickt aus	1	1
			m1	e4	dadurch	e5	1
			m2	m1	dadurch	e6	0

so9-B: Münzen

Kodierung der Elemente und Beziehungen für so4-A

ELEMENTE			BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Becken (1)	2	e1	1	ist zu sehen	1	1
2	Becken (2)	2	e2	2	ist zu sehen	2	1
3	Münze (1)	2	e3	1	ist leer bis auf	3	1
4	Inneres	2	e4	3	ist nur halb zu sehen	3	1
5	Zwischenwand	2	e5	3	wurde positioniert in	4	1
6	Blick	2	e6	5	versperrt	6	1
7	selbe Stelle	3	e7	11	befindet sich in	2	1
8	Wasser	2	e8	8	befindet sich in	2	1
9	gewisse Höhe	2	e9	10	erkennt ganz	11	1
10	Beobachter	2	e10	11	ist scheinbar weiter entfernt von	12	1
11	Münze (2)	2	e11	13	spielt hier eine Rolle	13	1
12	Wand	2	e12	16	wird getroffen in	17	0
13	Brechung	3	e13	8	ist	15	1
14	Eintritt	3	e14	16	trifft auf	18	1
15	dichteres Medium	3	e15	19	wirken an	20	1
16	Licht	3	e16	19	sind wirklich	19	1
17	anderer Winkel	3	e17	2	ist neben	1	1
18	Oberfläche	2	m1	e5	sodass	e6	1
19	Dinge	3	m2	e4	da	m1	1
20	anderer Ort	3	m3	e7	an	7	1
			m4	e8	bis zu gewisser	9	1
			m5	e9	durch	8	1
			m6	e9	da	e10	1
			m7	e12	bei	14	0
			m8	m7	in	15	0
			m9	e12	als	e14	0
			m10	m9	ist	13	0
			m11	e15	als	e16	1
			m12	m11	durch	13	0

E.3 KODIERUNGEN DURCH ZWEI BEURTEILER

eo3-A2: Laserstrahl

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der Elemente für eo3-2-A

ID	LABEL	CODER 1	CODER 2
1	Beobachter	2	2
2	Glaswand	2	2
3	Aquarium	2	2
4	Wasser	2	2
5	Oberfläche	2	2
6	Laserstrahl	2	2
7	Stärke	2	2
8	Knick	2	2
9	Brechungsgesetz	3	3
10	Brechzahl	3	3
11	Übergang	3	3
12	Partikeln (1)	3	4
13	Partikeln (2)	3	4
14	Luft	2	2
15	Richtungen	3	0
16	Weg	3	3
17	Licht (1)	3	3
18	Grenzfläche (1)	3	3
19	Richtungsänderung	3	3
20	Licht (2)	3	0
21	Grenzfläche (2)	3	0
22	Bild	2	3
23	Teil	2	2
24	Perspektive	2	2
25	tatsächliche Form	2	2
26	geknickter Laser	2	2
<hr/>			
$b_0 = 0,77$			
$b_{Zufall} = 0,41$			
$\kappa = 0,61$			
<hr/>			

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der Beziehungen für e03-2-A

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C ₂	ID	S	Label	T	C ₁
e1	3	hat	2	e2	e1	1	sieht senkrecht durch	2	e2
e2	1	sieht senkrecht durch	2	e1	e2	3	(hat)	2	e1
e3	3	ist gefüllt mit	4	e3	e3	3	ist gefüllt mit	4	e3
e4	4	hat	5	e5	e4	6	ist von schräg oben gerichtet auf	5	e5
e5	6	ist v.s.o. gerichtet auf	5	e4	e5	4	(hat)	5	e4
e6	6	wird nach unten abgeknickt an	5	e6	e6	6	wird nach unten abgeknickt an	5	e6
e7	8	hat	7	e8	e7	10	kann bestimmt werden aus	7	e10
e8	11	hat	10	e9	e8	8	(hat)	7	e7
e9	5	ist	11	-	e9	11	(hat)	10	e8
e10	10	kann bestimmt werden aus	7	e7	e10	6	ist sichtbar für	1	e11
e11	6	ist sichtbar für	1	e10	e11	6	wird gestreut an	12,13	e14
e12	12	sind in	14	e13	e12	6	wird gestreut in	15	m2
e13	13	sind in	4	e14	e13	12	(sind) in	14	e12
e14	6	wird gestreut an ... und ...	12	e11	e14	13	(sind) in	4	e13
e14	6	wird gestreut an ... und ...	13	e11	e15	17	trifft auf keine	18	e17
e15	17	wird gestreut in	14	e18	e16	16	(führt) zu	1	m4
e16	17	ist auf	16	e17	e17	17	(ist) auf	16	e16
e17	17	trifft auf keine	18	e15	e18	17	(ist) gestreut in	14	e15
e18	2	kann vernachlässigt werden	2	e19	e19	2	kann vernachlässigt werden	2	e18
e19	17	erfährt keine	19	e20	e20	17	erfährt keine	19	e19
e20	20	wird gestreut in	4	e22	e21	20	trifft nahezu senkrecht auf	21	e21
e21	20	trifft senkrecht auf	21	e21	e22	20	(ist) gestreut in	4	e20
e22	21	(ist) zwischen ... (und) ...	4	e23	e23	4,14	haben	21	e22
e22	21	(ist) zwischen ... (und) ...	14	e23	e24	20	erfährt ebenfalls keine	19	e23
e23	20	erfährt ebenfalls keine	19	e24	e25	1	sieht (...) vor (...)	22,6	e26
e24	6	hat	23	e26	e26	6	(hat)	23	e24
e25	23	hat	22	e28	e27	23	(ist) unter	4	e27
e26	1	sieht	22	e25	e28	23	(hat)	22	e25
e27	23	(ist) unter	4	e27	e29	26	erscheint (...) in (...)	1,25	m8
e28	26	erscheint	1	e29	e30	1	(hat)	24	m9
m1	e10	nach	9	m1	m1	e7	nach	9	m1
m2	e14	in alle	15	e12	m2	e10	weil	e11, e12	-
m3	e11	weil	m2	m2	m3	e20	da	e15	m5
m4	e16	zu	1	e16	m4	e21	dadurch	e25	-
m5	e17	daher	e19	m3	m5	m4	deshalb	e29	-
m6	e26	vor	6	-					
m7	e23	dadurch	m6	-					
m8	e28	in	25	-					
m9	m8	in	24	-					
m10	m6	deshalb	m9	m5					
$n(c1 \in C2)_{e03-2-A} = 32/40$					$n(c2 \in C1)_{e03-2-A} = 30/35$				

e03-B: Münzen

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der Elemente für e03-B

ID	LABEL	CODER 1	CODER 2
1	Beobachter	2	2
2	Bild	0	1
3	Aquarium (1)	2	2
4	Aquarium (2)	2	2
5	Münze (1)	2	2
6	Boden (1)	2	2
7	hinterer Teil	2	2
8	Lichtweg	3	3
9	vorderer Teil	2	2
10	Wand	2	2
11	Wasser	2	2
12	Münze (2)	2	0
13	Boden (2)	2	0
14	Lichtstrahlen	3	3
15	Oberfläche	2	2
16	Brechungsgesetz	3	3
17	Lot	3	3
18	Knick	3	2
19	Bild	2	3
20	rückwärtige Verlängerungen	3	3
21	geknickte Lichtstrahlen	3	3
22	tatsächlicher Ort	2	2
23	Licht	3	3
24	vordere Wand	2	0
25	Weg	2	3
$h_0 = 0,72$ $h_{Zufall} = 0,43$ $\kappa = 0,51$			

eo3-C: Bleistift

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der Elemente für eo3-C

ID	LABEL	CODER 1	CODER 2
1	Beobachter	2	2
2	Aquarium (links)	2	2
3	Aquarium (rechts)	2	2
4	Stift (links)	2	2
5	Stift (rechts)	2	2
6	Rückwand (links)	2	2
7	Rückwand (rechts)	2	2
8	Lichtstrahlen (links)	3	3
9	Lichtstrahlen (rechts)	3	0
10	Bild (links)	3	3
11	Übergang	3	3
12	Wasser	2	2
13	Luft	2	2
14	Brechungsgesetz	3	3
15	Lot	3	3
16	Vorgang	3	3
17	Bild (rechts)	3	0
18	Punkte	3	3
19	Gefäßboden	2	2
20	Schnittpunkt	3	3
21	rückwärtige Verlängerung	3	3
22	geknickte Lichtstrahlen	3	3
23	tatsächliche Position	2	2
24	Teil	2	2
25	Auge	0	2
$h_0 = 0,88$			
$h_{Zufall} = 0,44$			
$\kappa = 0,78$			

soi-A: Laserstrahl

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der Elemente für soi-A

ID	LABEL	CODER 1	CODER 2
1	Beobachter	2	2
2	Hälfte	2	2
3	Wasser	2	2
4	Becken	2	2
5	Strahl	2	2
6	Auftreffen	2	0
7	Wasseroberfläche	2	2
8	stumpfer Winkel	2	2
9	optische Dichte (Luft)	3	3
10	optische Dichte (Wasser)	3	3
11	Luft	2	2
12	Brechung	3	3
13	Lot	3	3
<hr/>			
$b_0 = 0,92$			
$b_{Zufall} = 0,52$			
$\kappa = 0,84$			
<hr/>			

soi-C: Bleistift

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der Elemente für soi-C

ID	LABEL	CODER 1	CODER 2
1	Brechung	3	3
2	Beobachter	2	2
3	Knick	2	2
4	Tiefe (1)	2	2
5	Tiefe (2)	2	2
6	Becken (1)	2	2
7	Becken (2)	2	2
8	Wasser	2	0
9	Neigung	2	2
10	Stift	2	2
11	Stiftteil	2	2
12	Teil	2	2
13	stumpfer Winkel	2	2
$b_0 = 0,92$			
$b_{Zufall} = 0,79$			
$\kappa = 0,64$			

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der Beziehungen für soi-C

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C2	ID	S	Label	T	C1
e1	2	nimmt wahr	3	e1	e1	2	nimmt wahr	3	e1
e2	6	erscheint flacher als es ist	6	e2	e2	6	erscheint flacher als	6	e2
e3	6	hat	4	e3	e3	6	(hat)	4	e3
e4	7	hat	5	e4	e4	7	(hat)	5	e4
e5	4	erscheint geringer (als)	5	e7	e5	4	ist gleich	5	e13
e6	6	(ist gefüllt) mit	8	e6	e6	6	(ist gefüllt) mit	8	e6
e7	4	erscheint etwa halb so tief (wie)	5	e8	e7	4	erscheint geringer (als)	5	e5
e8	10	hat	9	e9	e8	4	erscheint etwa halb so tief (als)	5	e7
e9	9	erscheint gestaucht	9	e10	e9	10	(hat)	9	e8
e10	11	(ist) über	8	e11	e10	9	wirkt gestaucht	9	e9
e11	12	(ist) unter	8	e12	e11	11	(ist) über	8	e10
e12	13	liegt zwischen ... und ...	11	e13	e12	12	(ist) unter	8	e11
e12	13	liegt zwischen ... und ...	12	e13	e13	13	liegt zwischen (...) und (...)	11,12	e12
e13	4	ist (gleich)	5	e5	m1	e1	durch	1	m1
m1	e1	durch	1	m1	m2	e8	dadurch	e10	m2
m2	e7	dadurch	e9	m2					
$n(c1 \in C2)_{01-C} = 16/16$					$n(c2 \in C1)_{01-C} = 15/15$				

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der fachlichen Bewertung für soi-C

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	Coder 1		Coder 2	
e1	Beobachter	nimmt wahr	Knick	1		1	
e2	Becken (1)	erscheint flacher als es ist	Becken (1)	1		1	
e3	Becken (1)	hat	Tiefe (1)	1		1	
e4	Becken (2)	hat	Tiefe (2)	1		1	
e5	Tiefe (1)	erscheint geringer (als)	Tiefe (2)	1		1	
e6	Becken (1)	(ist gefüllt) mit	Wasser	1		1	
e7	Tiefe (1)	erscheint etwa halb so tief (wie)	Tiefe (2)	1		1	
e8	Stift	hat	Neigung	1		1	
e9	Neigung	erscheint gestaucht	Neigung	1		o	die Neigung (im Sinne von Schiefe/Winkel) kann nicht gestaucht sein
e10	Stiftteil	(ist) über	Wasser	1		1	
e11	Teil	(ist) unter	Wasser	1		1	
e12	stumpfer Winkel	liegt zwischen ... und ...	Stiftteil	1		1	
		liegt zwischen ... und ...	Teil	1		1	
e13	Tiefe (1)	ist (gleich)	Tiefe (2)	1		1	ich weiß gerade nicht, worauf sich diese Tiefen beziehen...
m1	Beobachter nimmt wahr Knick	durch	Brechung	o	Brechung ist allein keine Ursache für das Phänomen.	o	das ist mir als Aussage zu allgemein
m2	Tiefe (1) erscheint etwa halb so tief wie Tiefe (2)	dadurch	Neigung erscheint gestaucht (Neigung)	1		o	ist sowas wie ein Folgefehler wg. Zeile 10
$p_{rel} = .88$							

so4-A: Laserstrahl

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der Elemente für so4-A

ID	LABEL	CODER 1	CODER 2
1	Licht	3	3
2	Welle	4	4
3	Lichtwelle	4	4
4	Luft	2	2
5	Wasser	2	2
6	Material	2	2
7	Wasseratome	4	4
8	Lichtstrahlen	3	3
9	Laser	2	2
$b_0 = 1$ $b_{Zufall} = 0,36$ $\kappa = 1$			

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der fachlichen Bewertung für so4-A

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	Coder 1	Coder 2
e1	Licht	ist	Welle	1	1 eigentlich ist Licht ja keine Welle, sondern hat nur Eigenschaften einer Welle, aber egal.
e2	Lichtwelle	wird nicht beeinflusst durch	Luft	1 stimmt nur Näherungsweise	0
e3	Wasser	ist	Material	1	1
e4	Wasser	ist anders als	Luft	1	1
e5	Licht	wird anders gebrochen als nur in	Luft	1	1
e6	Lichtstrahlen	gehen durch	Luft	1	0 oh, nein diese Strahlen. Streng genommen ist das so nicht richtig, (fast) jeder würde aber so sprechen...
e7	Licht	prallt anders ab an	Wasser	0 WW zwischen Strahlung und Materie durch "Abprallen" nur beim Compton Effekt	0
e8	Laser	ist auch	Welle	1 Steht sogar so bei Wikipedia	1 der Laser als solcher ist ein Festkörper, aber das Laserlicht ist von mir aus eine Welle
e9	Laser	wird gebrochen wie	Licht	1	1 eieieiei
m1	Licht wird anders gebrochen als nur in Luft	durch	Wasseratome	0 Wechselwirkung mit einzelnen Atomen ist nicht die Ursache der Brechung, außerdem Folgefehler nach e5	0
$p_{rel} = .8$					

so7-C: Bleistift

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der Beziehungen für so7-C									
Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C2	ID	S	Label	T	C1
e1	1	erscheint gebrochen bzw. (nach oben) abgeknickt	1	e1	e1	1	erscheint „gebrochen“ bzw. abgeknickt	1	e1
e2	2	ist 1,33	2	-	e2	2	(ist anders als)	3	e4
e3	3	ist 1	3	-	e3	4	wird gebrochen hin zu	5	e5
e4	2	ist anders als	3	e2	e4	1	sieht nach oben abgeknickt aus	1	e6
e5	4	wird gebrochen hin zu	5	e3	m1	e3	durch	e2	m1
e6	1	sieht nach oben abgeknickt aus	1	e4	m2	m1	dadurch	e4	m2
m1	e4	dadurch	e5	m1					
m2	m1	dadurch	e6	m2					
$n(c1 \in C2)_{so7-C} = 6/8$					$n(c2 \in C1)_{so7-C} = 6/6$				

£

so9-B: Münzen

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der Elemente für so9-B

ID	LABEL	CODER 1	CODER 2
1	Becken (1)	2	2
2	Becken (2)	2	2
3	Münze (1)	2	2
4	Inneres	2	2
5	Zwischenwand	2	2
6	Blick	2	2
7	selbe Stelle	3	3
8	Wasser	2	2
9	gewisse Höhe	2	2
10	Beobachter	2	0
11	Münze (2)	2	2
12	Wand	2	2
13	Brechung	3	3
14	Eintritt	3	3
15	dichteres Medium	3	3
16	Licht	3	3
17	anderer Winkel	3	3
18	Oberfläche	2	2
19	Dinge	3	3
20	anderer Ort	3	3
21	Vermutung	0	3
$b_0 = 0,90$			
$b_{Zufall} = 0,46$			
$\kappa = 0,82$			

Beurteilerübereinstimmung bzgl. der fachlichen Bewertung für so9-B

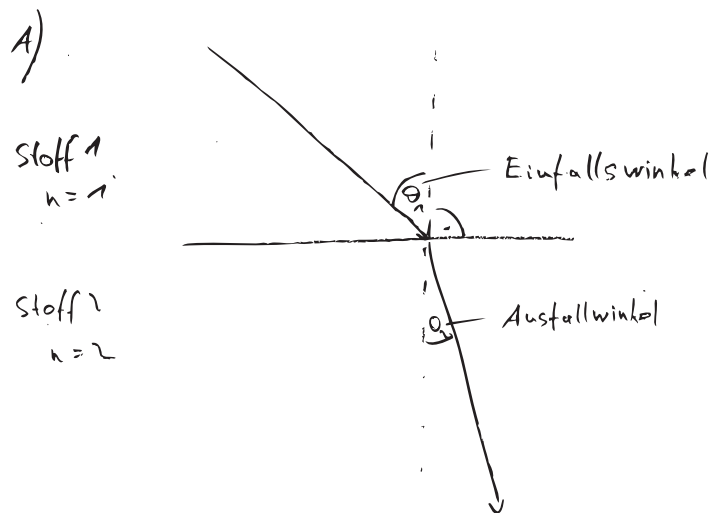
ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	Coder 1		Coder 2	
e1	Becken (1)	ist zu sehen	Becken (1)	1		1	
e2	Becken (2)	ist zu sehen	Becken (2)	1		1	
e3	Becken (1)	ist leer bis auf	Münze (1)	1		1	
e4	Münze (1)	ist nur halb zu sehen	Münze (1)	1		1	
e5	Münze (1)	wurde positioniert in	Inneres	1		1	
e6	Zwischenwand	versperrt	Blick	1		1	
e7	Münze (2)	befindet sich in	Becken (2)	1		1	
e8	Wasser	befindet sich in	Becken (2)	1		1	
e9	Beobachter	erkennt ganz	Münze (2)	1		1	
e10	Münze (2)	ist scheinbar weiter entfernt von	Wand	1		1	kann ich grade nicht ganz prüfen, weil ich das Bild nur undeutlich vor Augen habe
e11	Brechung	spielt hier eine Rolle	Brechung	1		1	
e12	Licht	wird getroffen in	anderer Winkel	o	Formulierung	o	
e13	Wasser	ist	dichteres Medium	1		1	als Luft
e14	Licht	trifft auf	Oberfläche	1		1	
e15	Dinge	wirken an	anderer Ort	1		o	?
e16	Dinge	sind wirklich	Dinge	1		1	
e17	Becken (2)	ist neben	Becken (1)	1		1	
m1	Münze (1) wurde positioniert in Inneres	sodass	Zwischenwand versperrt Blick	1		1	
m2	Münze (1) ist nur halb zu sehen (Münze (1))	da	Münze (1) wurde positioniert in Inneres sodass Zwischenwand versperrt Blick	1		1	siehe oben
m3	Münze (2) befindet sich in Becken (2)	an	selbe Stelle	1		1	
m4	Wasser befindet sich in Becken (2)	bis zu gewisser	gewisse Höhe	1		1	
m5	Beobachter erkennt ganz Münze (2)	durch	Wasser	1	unsauber	1	
m6	Beobachter erkennt ganz Münze (2)	da	Münze (2) ist scheinbar weiter entfernt von Wand	1		1	
m7	Licht wird getroffen in anderer Winkel	bei	Eintritt	o	Folgefehler nach e12	o	Woher stammt die Beschreibung "Licht wird getroffen"
m8	Licht wird getroffen in anderer Winkel bei Eintritt	in	dichteres Medium	o	Folgefehler nach e12	o	
m9	Licht wird getroffen in anderer Winkel	als	Licht trifft auf Oberfläche	o	Folgefehler nach e12	o	
m10	Licht wird getroffen in anderer Winkel als Licht trifft auf Oberfläche	ist (wird bezeichnet als)	Brechung	o	Folgefehler nach e12	o	
m11	Dinge wirken an anderer Ort	als	Dinge sind wirklich (Dinge)	1		1	
m12	Dinge wirken an anderer Ort als Dinge sind wirklich	durch	Brechung	o	zu stark vereinfacht	o	zu allgemein
$p_{rel} = .97$							

F MATERIALIEN DER HAUPTSTUDIE

F.1 ERKLÄRUNGEN

aoi-A

- 1 Fällt Licht (1) auf die Grenzfläche (2) von 2 Stoffen (3,4) so lassen sich charakteristische Brechungsphänomene (5) beobachten, welche (5) als Beispiel für die Wellennatur (6) des Lichts (1) verstanden werden können.
- 3 Ursache (7) hierfür ist die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit (8,9) des Lichts (1) in verschiedenen Medien (3,4), deren (3,4) stofflicher Aufbau (10) zu einer, für den jeweiligen Stoff (3,4) typischen Lichtgeschwindigkeit (8,9) führt, welche (8,9) jedoch immer geringer ist als die Vakuumlichtgeschwindigkeit (11).
- 6 In der Strahlenoptik (12) kann der Brechungswinkel (13) mithilfe des Snellius'schen Brechungsgesetzes (14) berechnet werden, welches (14) Einfallswinkel (15) und Ausfallwinkel (16) über die Brechungskoeffizienten (17, 18) miteinander in Beziehung (21) setzt ($\sin(\theta_1) / \sin(\theta_2) = n_1 / n_2$ (20)). Dabei gilt im Allgemeinen, dass der Strahl (22) in Richtung (23) des Lots (24) hingebrochen wird wenn der Übergang (25) von dünnerem (26) zu dichterem Medium (27) geschieht ($n_1 < n_2$ (29)), und vom Lot (24) weg bei Übergang (28) von dicht zu dünn.
- 12 Da der Beobachtungswinkel (30) senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung (31) des Laserstrahls (32) steht tritt keine zusätzliche Brechung (33) auf wenn die, vom Wasser (34) gestreuten, Photonen (35) in Richtung (36) des Beobachters (42) durch die Grenzflächen (37, 40) Wasser (34)-Glas (38), Glas (38)-Luft (39) gehen da hier der Einfallswinkel (15) 0 ist. Die einzige Stelle (41) an der hier wirklich Brechung (33) auftritt ist daher
- 16 dort wo der gebündelte Laser (32) auf das Wasser (34) trifft.



Skizze des Probanden aoi zum Bild A (Laserstrahl)

a01-B

- 1 Fällt Licht (1) auf die Grenzfläche (2) von 2 Stoffen (3,4) so lassen sich charakteristische Brechungsphänomene
 2 (5) beobachten, welche als Beispiel für die Wellennatur (6) des Lichts (1) verstanden werden können. Ursache
 3 (7) hierfür ist die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit (8,9) des Lichts (1) in verschiedenen Medien
 4 (40,41), deren (40,41) stofflicher Aufbau (10) zu einer, für den jeweiligen Stoff (3,4) typischen Lichtgeschwin-
 5 digkeit (8,9) führt, welche (8,9) jedoch immer geringer ist als die Vakuumlichtgeschwindigkeit (11).
- 6 In der Strahlenoptik (12) kann der Brechungswinkel (13) mithilfe des snellius'schen Brechungsgesetzes (14)
 7 berechnet werden, welches (14) Einfallswinkel (15) und Ausfallwinkel (16) über die Brechungskoeffizienten (16,17)
 8 miteinander in Beziehung (21) setzt ($\sin(\theta_1) / \sin(\theta_2) = n_1 / n_2$ (20)). Dabei gilt im Allgemei-
 9 nen, dass der Strahl (22) in Richtung (23) des Lots (24) hingebrochen wird wenn der Übergang (25) von
 10 dünnerem (26) zu dichterem Medium (27) geschieht ($n_1 < n_2$) (39), und vom Lot (24) weg bei Übergang (28)
 11 von dicht zu dünn.
- 12 In dem speziellen Beispiel der Münze (29), welche (29) einmal in einer leeren (30) und einmal in einer, mit
 13 Wasser (32) gefüllten, Box (31) liegt, wird das Licht (1) welches (1) von der Münze (29) in die Richtung (33)
 14 des Beobachters (34) reflektiert wird an der Grenzfläche (35) von Wasser (32) zu Luft (36) gebrochen. Da der
 15 Übergang (28) von dicht zu dünn ist, wird es (1) dabei vom Lot (24) weg gebrochen. Durch die Brechung
 16 (37) der Strahlen (38) sieht es daher so aus als würde die Münze (29) weiter hinten liegen als sie (29) es
 17 tatsächlich tut.

a02-A

- 1 Licht (1) besitzt Wellencharakter (2). Dadurch hängt die Lichtgeschwindigkeit (3) von den Eigenschaften
 2 (4) des Mediums (5) ab, in dem (5) es (1) sich fortbewegt. Weiterhin besitzt Licht (1) die Eigenschaft (6), stets
 3 den Weg (7) zwischen zwei Punkten (8,9) zurückzulegen, der (7) die geringste Zeit (10) benötigt (Fermatsches
 4 Prinzip (11)). Bewegt sich ein Lichtstrahl (12) nun durch zwei verschiedene Medien (13,14), das erste Medium
 5 (13) mit einem höheren Brechungsindex (15) als das zweite (14) -also einer geringeren Geschwindigkeit (16)
 6 des Lichts (1)- dann muss das Licht (1), um die geringste Zeitdauer (10) zu erreichen, eine längere Strecke
 7 (17) in dem Medium (13) mit dem höheren Brechungsindex (15) zurücklegen. Nun hat Wasser (18) einen
 8 höheren Brechungsindex (15) als Luft (19). Somit wird der Lichtstrahl (12) zum Lot (20) der Grenzfläche
 9 (21) hin gebrochen, und legt dadurch eine geringere Strecke (22) im Wasser (18) zurück, als wenn er (12) die
 10 Punkte (23) gerade verbunden hätte.

a02-B

- 1 Licht (1) besitzt Wellencharakter (2). Dadurch hängt die Lichtgeschwindigkeit (3) von den Eigenschaften
 2 (4) des Mediums (5) ab, in dem (5) es (1) sich fortbewegt. Weiterhin besitzt Licht (1) die Eigenschaft (6), stets
 3 den Weg (7) zwischen zwei Punkten (8,9) zurückzulegen, der (7) die geringste Zeit (10) benötigt (Fermatsches
 4 Prinzip (11)). Bewegt sich ein Lichtstrahl (12) nun durch zwei verschiedene Medien (13,14), das erste Medium
 5 (13) mit einem höheren Brechungsindex (15) als das zweite (14) -also einer geringeren Geschwindigkeit (16)
 6 des Lichts (1)- dann muss das Licht (1), um die geringste Zeitdauer (10) zu erreichen, eine längere Strecke (17)
 7 in dem Medium (13) mit dem höheren Brechungsindex (15) zurücklegen. Nun hat Wasser (18) einen höheren
 8 Brechungsindex (15) als Luft (19). Somit wird der Lichtstrahl (12) zum Lot (20) der Grenzfläche (21) hin
 9 gebrochen, und legt dadurch eine geringere Strecke (22) im Wasser (18) zurück, als wenn er (12) die Punkte
 10 (23) gerade verbunden hätte. Der menschliche Betrachter (24) geht davon aus, dass Lichtstrahlen (12) einen
 11 geraden Weg (25) vom Objekt (26) zum Betrachter (24) zurücklegen. Da die gebrochenen Lichtstrahlen
 12 (27) allerdings einen flacheren Austrittswinkel (28) aus der Wasseroberfläche (29) aufweisen als die direkte

- 13 Verbindungslinie (30) zwischen Auge (24) und Münze (31), erhält er (24) den Eindruck (32), das Objekt (31)
14 läge weiter hinten in dem Behälter (33).

ao3-A

- 1 Der Laserstrahl (1) wird beim eintreten (2) in das Wasser (3) gekrümmt. Dies ist durch unterschiedliche
2 Stoffeigenschaften (4,5) von Luft (6) und Wasser (3) zu erklären, ist also Temperatur und Stoffspezifisch. Da
3 Wasser (3) eine höhere Stoffdichte (7) hat, als Luft (6) ist die Brechzahl (8) des Wassers (3) deutlich höher als die
4 (9) der Luft (6). Das führt dazu, dass der Lichtstrahl (10) gebrochen wird. Da sich der Strahl (10) von einem
5 optisch dünneren Stoff (11) zu einem optisch dichteren (12) bewegt, wird er (10) zum sogenannten Lot (13)
6 hin gebrochen. Das Lot (13) ist eine imaginäre Linie (14), die (14) sich orthogonal zur Brechungsoberfläche
7 (15) (hier das Wasser (3)) am Punkt (16) des Eintretens (2) befindet. Der Brechungswinkel (17) ist somit
8 kleiner, als der Einfallswinkel (18). Würde der Strahl (10) vom Wasser (3) in Luft (6) übergehen, wäre es
9 folglich genau andersherum.

ao3-B

- 1 Ein optischer Effekt (1), zurück zu führen auf die Brecheigenschaften (2) der verschiedenen verwendeten
2 Stoffe (3,4), ist hier gut zu beobachten. Wasser (4) und Luft (3) besitzen nämlich eine unterschiedliche
3 Stoffdichte (5,6), was deren Brecheigenschaften (2) definiert. Diese (5, 6) ist Temperatur und Stoffspezi-
4 fisch. Da Wasser (4) wesentlich optisch Dichter ist als Luft (3), wird Licht (7) beim durchqueren (8) der
5 Grenzschicht (9) beider Stoffe (3,4) gebrochen. Da es (7) hier sich von einem optisch dichteren (11) zu ei-
6 nem optisch dünnerem Material (10) bewegt, wird es (7) vom Lot (12) hinweg gebrochen. Das Lot (12) ist
7 eine imaginäre Linie (13) die (13) sich orthogonal zu der Oberfläche (14) am Ort (15) der Durchquerung (8)
8 eines Lichtstrahls (16) befindet. Somit ist der Ausfallswinkel (17) größer als der Einfallswinkel (18). Deshalb
9 wirkt es, als würde die Münze (19) sich an einem andren Ort (29) befinden. Also wie fangen Vögel Fische
10 Wasser? Sie versuchen den Einfallswinkel möglichst klein zu halten, sodass die optische Position leichter zu
11 ermitteln ist. Sie fliegen über dem Fisch!

ao4-A

ERKLÄRUNG

- 1 Das abgebildete Foto A zeigt einen Behälter (1) gefüllt mit einer durchsichtigen Flüssigkeit (2). Es kann
2 angenommen werden, dass es sich bei dieser Flüssigkeit (2) um Wasser (3) handelt. Im oberen linken Feld ist
3 ein Laser (4) zu sehen dessen (4) Strahl (5) auf den Behälter (1) gerichtet ist. In dem Moment (6), da der gerade
4 gerichtet Strahl (5) auf das Wasser (3) trifft, verändert sich seine richtung (7) und für das menschliche Auge
5 (8) erscheint er (5) "abgeknickt". Der Grund (9) für diese optische Täuschung (10) liegt in der Brechung (11).
6 Unterschiedliche Medien (12) (hier Wasser (3) und Luft (13)) besitzen verschiedene Eigenschaften (14) was
7 die Durchlässigkeit (15) von Licht (16) angeht, genannt Brechungsindex (17).

ao4-B

- 1 Im Foto B sind 2 Boxen (1,2) zu sehen, in denen (1,2) sich jeweils 2 Münze (3,4) befinden. Im linken Behälter
2 (1) (fortan 1 genannt) ist diese (3) nur halb zu sehen, im rechten Behälter (2) (Nummer 2) ist die Box (2)
3 noch mit wasser (5) gefüllt. Während in in 1 (1) die Münze (3) halb verdeckt vorzufinden ist, ist die Münze
4 (4) in 2 (2) komplett zu sehen. Grund (6) für diesen Effekt (7) ist wiederum die im vorherigen "Kapitel"

5 benannte Brechung (8). Die Luft (9) als Medium (10) lässt das Objekt (3) halb erscheinen, das Wasser (5)
6 wiederumerlaubt es dem Probanden (11) quasi “um die Ecke (12)” zu schauen und die Münze (4) im ganzen
7 (13) zu betrachten.

boI-A

ERKLÄRUNG

1 Das Bild zeigt ein typisches Phänomen (1) der Physik (2): Lichtbrechung (3). Zu erkennen ist ,dass der
2 einfallende Laserstrahl (4) an der Oberfläche (5) seinen Richtung (6) ändert, er (4) wird gebrochen. Eine
3 Erklärung (7) dieses Verhaltens (8) liefert die Optik (9). So hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit (10),
4 also die Geschwindigkeit (11) mit der sich Licht (12) ausbreitet von dem Medium (13) ab, welches (13) die
5 Lichtstrahlen (14) umgibt.

6 Da Wasser (15) andere physikalische Eigenschaften (16) als Luft (17) hat, schreibt man ihm (15) auch einen
7 anderen Brechungsindex (19) zu. Der Brechungsindex (19) gibt an, wie stark das Medium (13) die Strahlen
8 (14) bricht. Ein Zusammenhang (20) von Einfallswinkel (21) und Ausfallswinkel (22) liefert das Snelliusche
9 Brechungsgesetz (23), es lautet

10 $n(\text{Luft}) \cdot \sin(\text{Einfallswinkel})(24) = n(\text{Wasser}) \cdot \sin(\text{Ausfallswinkel})(25),$

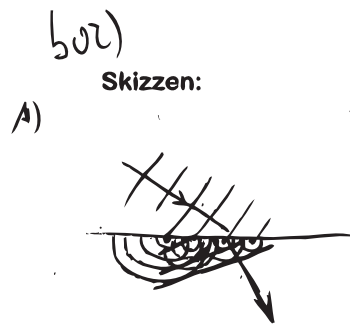
11 wobei n (26) der Brechungsindex (19) ist. Anwendbar ist das Gesetz (23) in der klassischen Geometrischen
12 Optik (27), nicht aber im Nahbereich (28).

boI-C

1 Auch hier zeigen sich wieder klassische Brechungsphänomene (1), der Stift (2) wirkt für das menschliche
2 Auge (3) deutlich gekrümmt, obwohl er (2) dies nicht ist. Eine Erklärung (4) liefern wieder die Brechungsge-
3 setze (5). Die in das Auge (3) einfallenden Lichtstrahlen (6) /Lichtphotonen (7) werden unterschiedlich
4 abgelenkt und treffen je nachdem anders auf das menschliche Auge (3). Im Gehirn (9) ergibt sich nun ein
5 zusammenhängendes Bild (8) welches (8) den Bleistift (2) verzerrt darstellt.

bo2-A

1 Die Brechung (1) des Laserstrahls (2) beim Übergang (3) von Luft (4) in Wasser (5) lässt sich auf die Ausbreit-
2 ungsgeschwindigkeit (6) des Lichts (7) in verschiednen Medien (8) zurückführen. Licht (7) breitet sich in
3 Wasser (5) langsamer aus als in Luft (4). Stellt man sich die Ausbreitung (9) des Lichts (7) mithilfe der
4 Huygenschen Elementarwellen (10) vor, so ist bei gleicher Frequenz (11) der Abstand (12) zwischen den ein-
5 zeln Wellenbergen (13) in Wasser (5) geringer als in Luft (4) (s. Skizze). Sieht man sich die Ausbreitungs-
6 richtung (14) an, die man graphisch erhält, indem man die Einhüllenden Wellenfronten (15) verbindet,
7 so ändert sich diese (14) beim Übergang (3), was der beobachteten Brechung (1) entpricht. Diese (1) kann
8 auch quantitativ durch das Brechungsgesetz (16) beschrieben werden und aus den einfachen hier gemach-
9 ten geometrischen Überlegungen (17) abgeleitet werden. In die Brechzahlen (18, 19) der Medien (8) geht die
10 Lichtgeschwindigkeit (6) im jeweiligen Medium (8) dabei explizit ein.

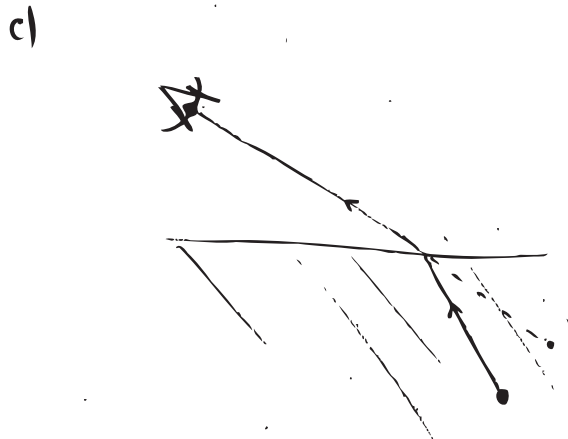


Skizzen des Probanden bo2 zum Bild A (Laserstrahl)

bo2-C

ERKLÄRUNG

- 1 Dieses Phänomen (1) lässt sich ebenfalls durch die Brechung (2) erklären. Die Lichtstrahlen (3), die vom Stift (4) in der linken Box (5) ausgehen, bewegen sich auf direktem Weg (6) zum Beobachter (7), da kein Übergang (8) zwischen Medien (9) vorliegt. Die Lichtstrahlen (11), die vom Stift (10) in Wasser (12) ausgehen, werden
- 4 dagegen beim Übergang (8) von Wasser (12) in Luft (13) gebrochen und treffen anschließend den Beobachter (7).
- 5 Der Beobachter (7) nimmt die Lichtstrahlen (11) nun also mit dem Winkel (14) nach der Brechung (2) wahr und konstruiert somit den Ursprung (15) dieser (11) an der (falschen) Position (16) (s. Skizze). Somit
- 7 entsteht der Eindruck (17) eines Knicks (18) im Stift (10) bzw. das die rechte Box (19) flacher als die linke (5) ist.
- 8 ist.



Skizzen des Probanden bo2 zum Bild C (Bleistift)

bo3-A

- 1 Erklärung: Die Abbildung zeigt einen Laserstrahl (1), der beim Übergang (2) von der Luft (3) (dem optisch
- 2 dünneren Medium (4)) in einen Behälter (5) mit Wasser (6) (optisch dichteren Medium (7)) einen Knick
- 3 (8) zu machen scheint. Untersucht man nun die Brechung (9) des Lichts (10) an der Wasseroberfläche (11)
- 4 erkennt man (18), dass sich der Strahl (12) beim Übergang (2) vom optisch dünneren Medium (4) zum
- 5 optisch dichteren Medium (7) zum Lot (13) hin bricht, das heißt, der Einfallswinkel (14) ist größer als der

- 6 Brechwinkel (15). Der Winkel (15) lässt sich mit Hilfe des Verhältnis (16) der Brechungindize (17) berechnen.
7 Dies führt dazu, dass der Strahl (12) geknickt erscheint.

bo3-C

- 1 ~~Erklärung:~~ Hier erscheinen sowohl der Bleistift (1) im mit Wasser (2) gefüllten Behälter (3) geknickt als auch
2 sein (3) Boden (4) näher zu sein als der im luftgefüllten Behälter (5). Das Bild (6) des Bleistifts (1) unter
3 Wasser (2) resultiert aus der Brechung (7) des Lichts (8), welches (8) auf den Gegenstand (1) fällt, beim
4 Austritt (9) aus dem Wasser (2) jedoch gebrochen wird, bevor es (8) auf das Auge (10) trifft. Bei diesem
5 Übergang (11) vom optisch dichteren Medium (12) zum optisch dünneren (13) wird das austretende Licht
6 (8) jedoch vom Lot (14) WEG, das heißt zur optischen Achse (15) (der Wasseroberfläche (16)) hin gebrochen.
7 Dadurch erscheint sein (1) Abbild (6) unter Wasser (2) auch näher und der Boden (4) des Gefäßes (3) ebenso.
8 ~~Danke für Eis und Kuchen. [Enter, senden.]~~

co1-B

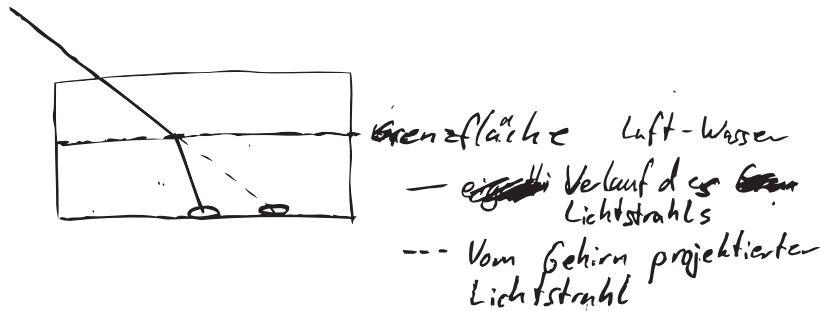
- 1 In der linken Box (1) befindet sich die Münze (2) im gleichen Medium (3) (Luft (4)) wie der Beobachter (5).
2 Deshalb sehen wir (5) die Münze (2) so wie sonst auch. In der rechten Box (6) befindet sich die Münze (7) in
3 einem anderen Medium (8) (Wasser (9)) als der Beobachter (5) (Luft (4)). Durch das Brechungsgesetz (10)
4 wird das von der Münze (7) reflektierte Licht (11) an der Grenze (12) zwischen den Medien (3,8) gebrochen,
5 wodurch der Anschein (13) entsteht, dass die Münze (7) im Wasser (9) sich weiter hinten befindet, als die
6 Münze (2) in der linken Box (1).

co1-C

- 1 ~~Ähnlich verhält es sich dabei bei den Stiften (1,2).~~ Das reflektierte Licht (3) des linken Stifts (1) wird ungehin-
2 dert / ungebrochen in unser (4) Auge (4) reflektiert, während das reflektierte Licht (5) des rechten Stiftes (2)
3 durch den Grenzübergang (6) zwischen den Medien (7) gebrochen wird und unter einem anderen Winkel
4 (8) auf das menschliche Auge (4) trifft. Dadurch entsteht die optische Täuschung (9), dass der Teil (10) des
5 Stifts (2), der sich unter Wasser (11) befindet, geknickt sei.

co2-B

- 1 Das Experiment (1) lässt vermuten, dass sich die Münze (2) in dem Behälter (3) mit dem Wasser (4) an einer
2 anderen Position (5) oder höher gelegen befindet. Dieser Eindruck (6) entsteht durch die Brechung (7) der
3 Lichtstrahlen (8) im Wasser (4). Nimmt man (10) einen nicht leuchtenden Gegenstand (9) mit den Augen
4 (10) war, so sieht man (10) eigentlich nur die reflektierten Lichtstrahlen (11) der Lichtquelle (12) wahr. Diese
5 reflektierten Strahlen (11) durchqueren in dem rechten Becken (13) nur Luft (14) und in dem rechten Becken
6 (3) zunächst Wasser (4) und dann Luft (14). Da die Lichtgeschwindigkeit (15) in Wasser (4) geringer ist, als
7 in Luft (14), braucht das Licht (16) unterschiedlich viel Zeit (17) für die beiden Teilstrecken (18). Nach dem
8 Fermatschen Prinzip (19) sucht sich das Licht (16) dabei den Weg (20) mit der kürzesten optischen Weglänge
9 (21). In dem linken Becken (13) ist dies (20) einfach eine Gerade (22), im Rechten (3) jedoch macht der Strahl
10 (23) an der Grenze (24) zwischen Luft (14) und Wasser (4) einen Knick (25). Das Auge, bzw. das Gehirn
11 (32) interpretieren das Licht (16) jedoch automatisch als geraden Strahl (26) und verlängern den Strahl (23)
12 gerade, sodass die Münze (2) weiter hinten zu liegen scheint. Das ist in Skizze 1 dargestellt. Das Phänomen
13 (27) lässt sich quantitativ mithilfe des Snelliusschen Brechungsgesetzes (28) analysieren, das (28) zusätzlich
14 den Brechungsindex (29) n (30) der Medien (31) benötigt.

Skizzen: *co2*

Skizze 1

Skizze des Probanden co2 zum Bild B (Münze)

co2-C

- 1 Die Geschwindigkeit (1,2) des Lichtes (3) ist im Wasser (4) etwas geringer als in der Luft (5). Dadurch be-
- 2 nötigt es (3) eine andere Zeit (6), um den Teilweg (7) im Wasser (4) zurückzulegen, als es (3) für den Weg
- 3 (8) durch die Luft (5) benötigt. Nach dem Fermatschen Prinzip (9) wird der Strahlengang (10) des Lichtes
- 4 (3) so optimiert, dass die optische Weglänge (11) des Lichtes (3) am geringsten wird. Dies führt effektiv zu
- 5 einem Knick (12) im Strahl (13) an der Grenzfläche (14) zwischen den beiden Medien (15). Das Gehirn (16)
- 6 interpretiert diesen Knick (12) jedoch, indem es (16) den Strahl (13) einfach gerade nach hinten verlängert.
- 7 Nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz (17) wird der Winkel (18) zwischen dem Einfallslot (19) senkrecht
- 8 zur Grenzfläche (14) und dem Strahl (13) größer, wenn der Strahl (13) von einem optisch dichteren (20) in
- 9 ein optisch dünneres Material (21) übergeht. Dies geschieht beim Übergang (22) von Wasser (4) in Luft (5).
- 10 Die optische Dicke (23) bezieht sich dabei auf den Brechungsindex (24), der (24) bei Wasser (4) größer als
- 11 bei Luft (5) ist. Der Teil (25) des Stiftes (26) im Wasser (4) erscheint daher etwas nach hinten verschoben,
- 12 wodurch der Eindruck (27) entsteht, dass der Stift (26) einen Knick (28) hat.

co3-B

- 1 Auf dieser Photographie sind zwei Kisten (1, 2) mit jeweils einer Münze (3,4) im Mittelpunkt (5,6) zu erken-
- 2 nen. Beide Münze (3,4) liegen am selben Punkt (5,6), die linke Kiste (1) mit der Münze (3) ohne Wasser
- 3 (7) scheint aber weiter vorn zu liegen, während die zweite Münze (4) mit der Kiste (2) mit Wasser (7) sich
- 4 scheinbar weiter hinten befindet. Dieses Phänomen (8) hängt mit der Brechung (9) des Lichts (10) bzw.
- 5 dem Brechungsindex n (11, 15) zusammen. Da dieser (11, 15) bei Wasser (7) höher ist als bei Luft (12), wird das
- 6 Licht (10) am stärksten gebrochen und es erscheint in der Wahrnehmung (13) als befände sie (4) sich an einem
- 7 anderen Punkt (14) als die Erste (3).

co3-C

- 1 Auf dieser Photographie kann man (1) zwei Stifte (2,3) sehen, die sich wieder am selben Ort (4) an der Kiste
- 2 (5,6) befinden. Die erste Kiste (5) ist ohne Wasser (7) während die zweite Kiste (6) ist mit Wasser (7) befüllt
- 3 ist. Der Stift (3) in Kiste zwei (6) erscheint, wegen der Lichtbrechung (8) des Wassers (7) nach oben ge-
- 4 krümmt, während der erste Stift (2) "gerade erscheint". Wieder lässt sich der selbe Effekt (9) wie auf Foto B

5 beobachten. Der höhere Brechungsindex (10) des Wassers (7) sorgt für eine andere Brechung (11) des Lichts
 6 (12), was dazu führt, dass der Gegenstand (3) in unserer (1) Wahrnehmung (13) krumm wahrgenommen
 7 wird.

co4-B

1 Auf der Abbildung sind 2 Glasbecken (1,2) mit jeweils einer Münze (3,4), welche (3,4) an genau der selben
 2 Stelle (5) liegen, zu sehen. Eins der Becken (2) ist mit Wasser (6) gefüllt, wodurch es dem Betrachter (7)
 3 so erscheint, als läge die 2. Münze (4) weiter nach Hinten verschoben. Beim Eintritt (8) Des Lichts (9)
 4 vom Dünnere (10) ins Dichtere Medium (11) wird das Licht (9) in Richtung (12) zum senkrechten Lot
 5 (13) hin gebrochen. Dadurch ist es möglich Die Münze (4) welche (4) im Wasser (6), eigentlich hinter der
 6 undurchsichtigen Wand (14) liegt vollständig zu sehen.

co4-C

1 Auf der Abbildung sind 2 Glasbecken (1,2) zu sehen, welche (1,2) an genau der selben Stelle (3) einen Bleistift
 2 (4,5) beinhalten. Durch die beim Eintritt (6) des Lichts (7) vom dünnere (8) zum dichteren Medium (9)
 3 verursachte Lichtbrechung (10) Erscheint der Bleistift (4), welcher (4) halb im Wasser (11) eingetaucht ist
 4 als abgelenkt. Dieses zum Lot (12) hin gebrochene Licht (13) lässt den Bleistiftspitze (14) nicht so tief er-
 5 scheinen, als beim nicht eingetauchten Bleistift (5).

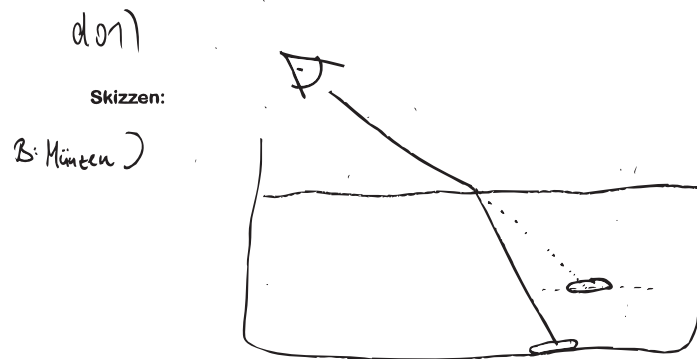
doi-A

1 Der Laserstrahl (1) kann als elektromagnetische Welle (2) mit geometrischer Optik (3) behandelt werden.
 2 Dieser (1) nimmt nach dem Fermatschen Prinzip (4) somit den Weg (5), der die kürzeste Zeit (6) in Anspruch
 3 (7) nimmt. Die Zeit (8) ist der Weg (9) geteilt durch die Geschwindigkeit (10). Normalerweise wird sein
 4 (1) Weg (5) also eine Gerade (11) sein. Nun hängt die Geschwindigkeit (12) von Licht (13) aber von dem
 5 optischen Medium (14) ab, in dem (14) es (13) sich ausbreitet. In einem optisch dünnen Medium (15), wie
 6 zum Beispiel Luft (16), ist der Brechungsindex (17) klein und die Geschwindigkeit (18) somit groß. In ei-
 7 nem optisch dichten Medium (19), wie zum Beispiel Wasser (20), ist der Brechungsindex (21) groß und
 8 die Geschwindigkeit (22) somit klein. Es besteht ein antiproportionaler Zusammenhang (23). Man kann
 9 sich vorstellen, dass der Laserstrahl (1) auf dem Bild von seinem Ausgangs- (24) zu seinem Endpunkt (25)
 10 gelangen will. Dabei ist er (1) in der Luft (16) schneller. Also lohnt es sich für ihn (1) dort mehr Weg (5)
 11 zurückzulegen als im Wasser (20), denn dort ist er (1) langsamer. Er (1) versucht also seine Laufzeit (24) zu
 12 minimieren. Das ist genau so wie bei einem Rettungsschwimmer, der so schnell wie möglich einen Punkt
 13 im Wasser erreichen will. Er wird den größeren Teil der Strecke an Land zurücklegen, da er dort schneller
 14 ist, und einen kleineren Teil im Wasser. Beim Übergang Land-Wasser macht er also einen Knick. Und genau
 15 das selbe macht auch der Laserstrahl.

doi-B

1 Wenn wir (1) die Münze (2) sehen, dann tun wir (1) dies, weil Licht (3), das (3) von der Münze (2) reflektiert
 2 wird, in unser (1) Auge (1) gelangt. Dieses Licht (3) kann man wieder als Strahlen (4) betrachten. Für diese
 3 (4) gelten dann wieder das Fermatsche Prinzip (5) und die Regeln der Brechung (6) (s. Laserstrahl). Der
 4 Lichtstrahl (7), der (7) in unser (1) Auge (1) gelangt, wird auf dem Weg (8) dorthin an der Grenzfläche
 5 (9) Wasser (10)- Luft (11) gebrochen. Unser (1) Gehirn (1) weiß das aber nicht. Es (1) denkt, dass Licht (3)
 6 sich geradlinig ausbreitet und verlängert den ankommenden Lichtstrahl (12) somit zu einer Geraden (13)

- 7 (s. Skizze). Dadurch wird die Münze (2) in unserem (1) Kopf (1) angehoben. Hat man kein Wasser (10) und
8 wird der geradlinige Weg (14) Münze (2)-Auge (1) außerdem durch eine Wand (2) versperrt, so könne wir (1)
9 die Münze (2) nicht sehen. Füllt man nun aber Wasser (10) in den Behälter (16), dann nimmt der Lichtstrahl
10 (7) nicht mehr den geraden Weg (14) und wir (1) könne ihn (2) eventuell doch sehen.



Skizze des Probanden doi zum Bild B (Münze)

do2-A

- 1 Im Foto A ist ein der Verlauf (1) eines Lichtstrahls (2) eines Lasers (3) zu erkennen, welcher (3) beim Eindring-
2 en (4) in ein anderes Medium (5) (Wasser (6) in diesem Fall) seine Ausbreitungsrichtung (7) ändert. Dieses
3 Phänomen (8) nennt man (Licht-) Brechung (9). Es gibt verschiedene Erklärungsmöglichkeiten um dies
4 zu beschreiben, je nachdem in welchem Modell (10) für das Licht (16) man sich befindet (Teilchen (11) -
5 Strahl (2) - Welle (12)). Die einfachste Methode (13) dies zu beschreiben ist im Rahmen der geometrischen
6 Optik (14), also als Lichtstrahl (2). Hierbei gilt für die Ausbreitung (15) des Lichts (16), das es sich nach dem
7 FERMAT'schen Prinzip (17) ausbreitet. Das heißt es (16) nimmt den ZEITLICH kürzesten Weg (18). War-
8 um biegt es (16) ab? Licht (16) bewegt sich in verschiedenen Medien (35) mit unterschiedlichen Geschwindig-
9 keiten (19, 20). Diese (19, 20) kann durch die Dispersionsgleichung (21) bestimmt werden. Da nun aber Licht
10 (16) im Wasser (6) eine andere Geschwindigkeit (19, 20) hat als in Luft (22), ist die gerade Strecke (23) nicht
11 mehr (wie es im einheitlichen Medium (5) der Fall ist) der zeitlich kürzeste Weg (18). Um dennoch von
12 Punkt A (24) zu Punkt B (25) zu gelangen in kürzester Zeit (26), muss es (16) zwischen durch abbiegen.
13 Insgesamt kann der Grad (27) der Biegung (28) durch das Snellius Brechungsgesetz (29) berechnet werden.
14 Die Herleitung (30) zu diesen Gesetzt (29) wird aus dem Wellenbild (31) für Licht (16) abgeleitet und kann
15 in der Elektrodynamik (32) bewiesen werden.

do2-B

- 1 ~~In diesem Bild~~ scheint es als läge die Münze (1,2) in den beiden Behältern (3,4) an unterschiedliche Stellen
2 (5), was durch ein senkrechten Bilck (6) von oben falsifiziert werden kann. ~~Nun ist die Frage~~, wieso es unter
3 einem anderen Winkel (7) dennoch so scheint, als wäre die Münze (1) woanders. Auch dieses Phänomen
4 (8) lässt sich auf die Brechung (9) von Licht (10) zurückführen. Hier ist es nicht das Licht (10) eines Lasers
5 (11), welches (10) gebrochen wird, sondern das Streu-Licht (12), was (12) auf die Münze (1) fällt. Damit auch
6 hier (im Modell (13) des Lichtstrahl (14)) auch das Fermat'sche Prinzip (15) ("Licht (10) nimmt den zeitlich
7 kürzesten Weg (16)") gilt, muss das Licht (10) beim Durchgang (17) einer Grenzfläche (18) die Richtung
8 (19) ändern, weil sich ja auch die Geschwindigkeiten (20) ändern. Dadurch scheint sich für den äußeren
9 Betrachter (21) die Lage (22) der Münze (1) geändert zu haben. ~~Dies wurde in Skizze 1 veranschaulicht.~~ Der

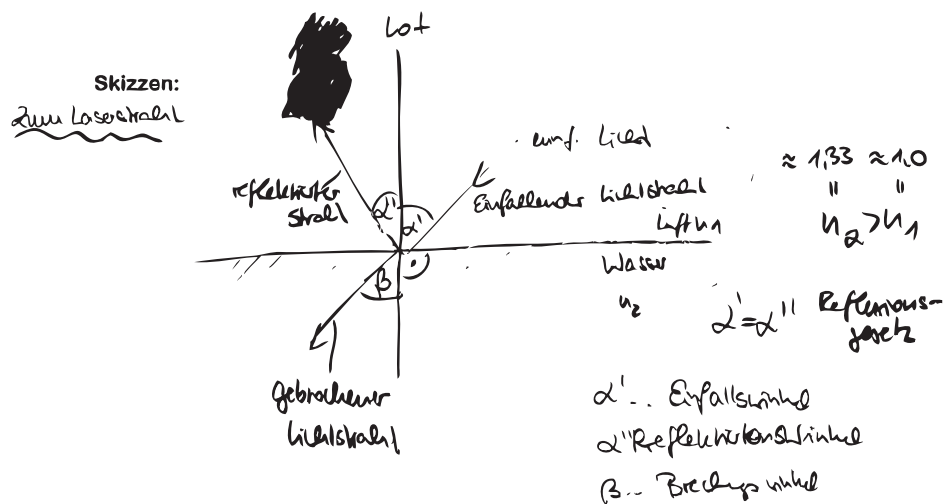
- 10 Grad (23) der Brechung (9) kann wie bekannt aus dem Snellius-Brechungsgesetz (24) abgeleitet werden. Die
 11 scheinbare Verschiebung (25) ist anschließend nur ein geometrisches Problem (26).

do3-A

- 1 Im beiliegenden Foto ist ein Laser (1) ersichtlich, dessen (1) Lichtstrahl (2) auf einen Behälter (3) mit Wasser
 2 (4) fällt. Innerhalb des Auftreffens (5) des Strahls (6) auf die Wasseroberfläche (6) findet ein Wechsel (7) des
 3 Mediums (8), vom optisch dünneren (9) (Luft (10)) in das optisch dickere (11) (Wasser (4)) statt. Wie zu
 4 erkennen ist, geht der Lichtstrahl (2) im Wasser (4) nicht dem Einfallsstrahl (12) folgend weiter, sondern er-
 5 scheint "abgelenkt". Zur Erklärung (13) betrachtet man die beim Übertritt (14) des Strahls (2) auftretenden
 6 Lichtstrahlen (15), die (15) dabei auftreten: Der einfallende Strahl (15) teilt sich in einen reflektierten (16) und
 7 einen gebrochenen Anteil (17) auf, welche (16, 17) sich in ihrem (16, 17) Winkel (18) (zu einem gedachten Lot
 8 (19), welches (19) senkrecht auf der Oberfläche (6) steht) unterscheiden. Der Zusammenhang (20) dieser
 9 Größen (21) wird über das Sn. Brechungsgesetz (22) beschrieben:

$$10 \quad n_1 * \sin(\alpha_1) (23) = n_2 * \sin(\alpha_2) (24)$$

- 11 Beim Übertritt (14) des Strahls (15) wird also nicht der gesamte Teil (25) des Strahls (15) reflektiert und nicht
 12 der gesamte Teil (25) gebrochen, sondern dem Gesetz (22) folgend die Anteile (16, 17) aufgeteilt. Der gebro-
 13 chene Teil (16) des Strahls (15) im Wasser (4) ist auch auf dem Foto visuell ersichtlich, der reflektierte (17)
 14 nicht.

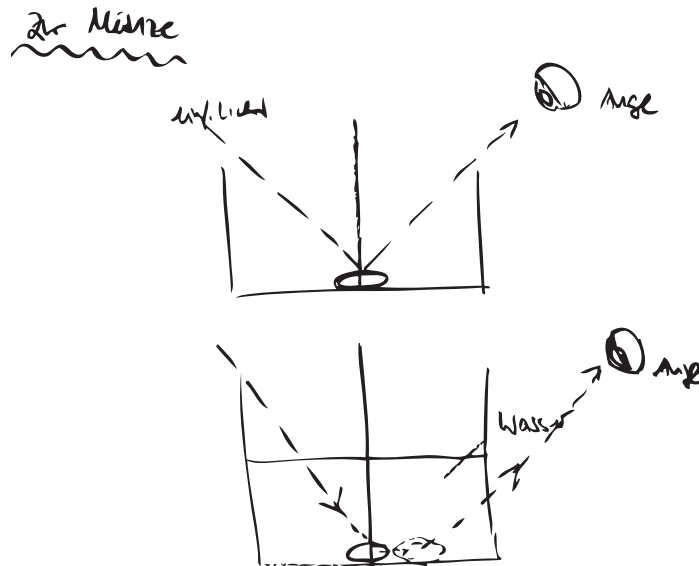


Skizze des Probanden do3 zum Bild A (Laserstrahl)

do3-B

- 1 Im beiliegenden Foto sind innerhalb von 2 Behältern (1,2) jeweils eine Münze (3,4) zentral auf dem Boden
 2 (5,6) ausgerichtet, jedoch der erste Behälter (1) mit Wasser (7) gefüllt und der zweite (2) nicht. Bei gerader,
 3 schräger Betrachtung (8) beider Behälter (1,2) wirkt die Münze (3) unter Wasser (7) in ihrer (3) Position (9)
 4 deutlich von der anderen Münze (4) verschoben. Zur Erklärung (10) betrachtet man erneut die Wirkung (11)
 5 des Wechsels (12) des Mediums (13) bei Übertritt (14) des einfallenden Lichtes (36) auf den Gegenstand (15)
 6 hin zum menschlichen Auge (16). Ohne das Wasser (7) erfährt der Lichtstrahl (17) keine Änderung (18) des
 7 Mediums (13), der reflektierte Anteil (19) des Lichtes (20) gelangt in unser Auge (16) und wir (16) nehmen die
 8 Münze (4) "normal" wahr. Innerhalb des Medienwechsels (12) im Wasserbehälter (1) erfährt der Lichtstrahl

- 9 (21) zunächst einen Wechsel (22) vom optisch dünneren (23) ins optisch dichtere Medium (24),
 10 wobei eine Aufspaltung (25) des Lichtstrahls (21) in reflektierten Anteil (26) und gebrochenen Anteil (27)
 11 auftritt. Um mittels unseres Auges (16) den Gegenstand (3) zu sehen, erfolgt ein erneuter Übertritt (28) des
 12 jetzigen vorhandenen Lichtstrahls (29) vom Wasser (7) in Luft (30), wo sich unser Auge (16) befindet. Die
 13 erneute Auftretung (31) der Aufteilung (25) in reflektierten Anteil (26) und gebrochenen Anteil (27) und
 14 die Nutzung (32) des Brechungsgesetz (33) führt zu einer scheinbaren Verschiebung (34) des Gegenstandes
 15 (15) von der eigentlichen Position (35) weg.



Skizze des Probanden do3 zum Bild B (Münze)

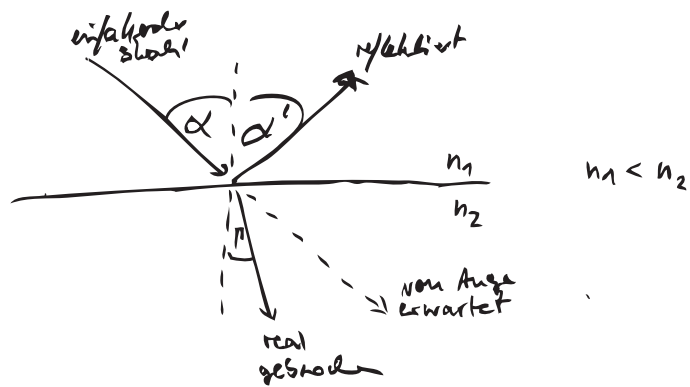
do4-A

- 1 Der Laserstrahl (1) geht durch die Luft (2) (Brechungsindex (3) n_1 (4)) ins Wasser (5) (Brechungsindex (6) n_2
 2 (7)), dabei sieht es aus, als würde er (1) abknicken. An der Grenzfläche (8) zwischen den Medien (9) wird
 3 der Laser (1) gebrochen (siehe Skizze) man würde erwarten, dass er (1) im gleichen Winkel (10) durch das
 4 Wasser (5) geht, aber da die Brechungsindizes (3,6) unterschiedlich sind, verändert sich der Winkel (11).
 5 Der Brechungsindex (12) hängt dabei von verschiedenen Dingen (13) ab (Temperatur (14), Luftfeuchte (15),
 6 Zusammensetzung (16), Dichte (17), Wellenlänge (18) und weiter). Trifft das Licht (19) vom optisch dünnen
 7 Medium (20) (kleinerer Brechungsindex (21)) auf ein optisch dichteres Medium (22) (größerer Brechungsindex
 8 (23)) so wird der Strahl (24) zu einem gedachten Lot (25) hin gebrochen, d.h. der Winkel (26) des gebro-
 9 chenen Strahls (27) β (28) ist kleiner als der Winkel (29) des einfallenden Strahls (30) α (31) (siehe
 10 Skizze). Wäre $n_1(4) > n_2(7)$ würde der Strahl (24) vom Lot (25) weg gebrochen werden.

do4-B

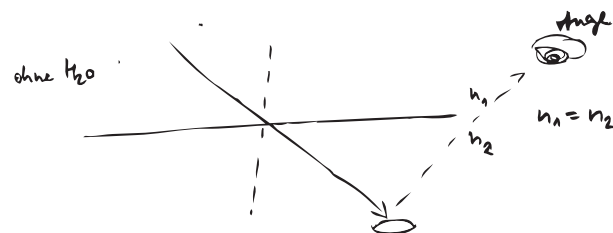
- 1 Die Münze (1), die im Wasser (2) liegt erscheint optisch "gehoben". Erwarten würde man (15), dass Licht
 2 (3), dass von einem optisch dünneren Medium (4) (Luft (5)) in ein optisch dichteres Medium (6) (Wasser
 3 (2)) geht, zu einem gedachten Lot (7) an den Grenzflächen (8) gebrochen wird, d.h. der Winkel (9) des
 4 gebrochenen Strahls (10) β (11) ist kleiner als der Winkel (12) des einfallenden Strahls (13) α (14) (siehe
 5 Skizze). Wieder erwarten sieht es jedoch für den Betrachter (15) so aus, als wäre genau das Gegenteil (16) der
 6 Fall (17), dass liegt daran, dass auch der Betrachter (15) in einem Winkel (18) auf die Münze (1) schaut.

Skizzen:
Teil A

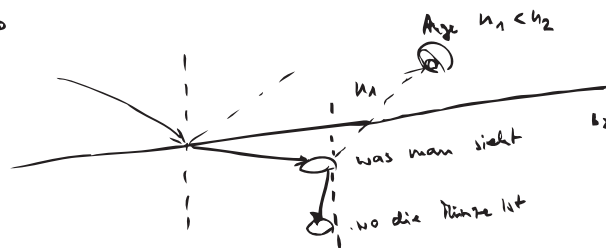


Skizze des Probanden do4 zum Bild A (Laserstrahl)

Teil B



mit H2O



Skizze des Probanden do4 zum Bild B (Münze)

eo1-A

1 Licht (1) kann in erster Näherung (2) als Strahl (3) approximiert werden. An der Grenzfläche (4) zweier
 2 Medien (5,6) unterschiedlicher Dielektrizitätskonstanten (7,8), zm Beispiel Wasser (9) und Luft (10), wird
 3 der Lichtstrahl (3) gebrochen aufgrund der Stetigkeitsbedingungen (11) Elektromagnetischer Felder (12).
 4 Die Stetigkeitsbedingungen (11) sind direkte Folgerungen (13) aus den Maxwellgleichungen (14). Licht (1)
 5 wird beim Übergang (15) vom optisch dünneren (16) zum optisch dichteren Medium (17) “zum Lot (18)
 6 hin” gebrochen, also der Winkel (19) der Flächennormalen (20) ist nach der Brechung (21) geringer. Daher
 7 erscheint der Laser-Strahl (22) beim Übergang (23) Luft (10) nach Wasser (9) nach unten hin geknickt.

eo1-C

1 Das vom Bleistift (1) reflektierte Licht (2) wird beim Übergang (3) vom optisch dichteren (4) (höhere Dielek-
 2 trizitätskonstante (6) des Mediums (4)) zum optisch dünneren Medium (5) gebrochen, das heißt, die Richt-
 3 ung (7) des Lichtstrahls (8) wird verändert. Da vom dünneren Medium (5) zum optisch dichteren Medium
 4 (4) vom Lot (9) weggebrochen wird, muss jeder Punkt (10) des Bleistiftes (1) “weiter oben” erscheinen, als er
 5 (10) in einer Geraden (11) zum Betrachter (12) zu erwarten ist. Daher erscheint der Bleistift (1) nach oben hin
 6 geknickt. Die Brechung (13) findet statt aufgrund von Stetigkeitsbedingungen (14) für elektromagnetische
 7 Felder (15) (Licht (16) ist ein Elektromagnetisches Feld (15) in Klassischer Physik (17)) an Grenzflächen (18),
 8 welche (14) eine direkte Folgerung (19) aus den Maxwellgleichungen (20) sind, welche in der Klassischen
 9 Physik (17) die Eigenschaften (21) von Elektromagnetischen Feldern (15) beschreiben.

eo2-A

1 ~~Im Foto~~ sieht man (1) einen Laserstrahl (2), der beim Übergang (3) von Luft (4) nach Wasser (5) abknickt.
 2 Dieses Phänomen (6) nennt man Brechung (7). Was (26) wir (1) als Laserstrahl (2) wahrnehmen, sind in
 3 Wirklichkeit (8) Lichtwellen (9), die (9) sich, wie jede Welle (10), mit einer bestimmten Geschwindigkeit (11)
 4 ausbreiten. Diese Wellen (9) sind elektromagnetischer Natur (12) - sie (9) besitzen also ein elektrisches Feld
 5 (13) (und ein Magnetfeld (14), ~~(was hier unterschlagen werden soll)~~). Außerdem besitzen Welle (9) besitzt
 6 zwei Komponenten (15,16) dieses elektrischen Feldes (13): Eine (15) senkrecht zur Wasseroberfläche (17) und
 7 eine (16) waagrecht. Durch Naturgesetze (18) von Feldern (19) an Grenzflächen (20) wird eine Komponente
 8 (21) ungehindert durchgelassen, die (22) andere nicht. Das resultierende Feld (23) im Wasser (5) nun hat eine
 9 andere Richtung (24), weshalb der Laserstrahl (2) in eine andere Richtung (25) verläuft.

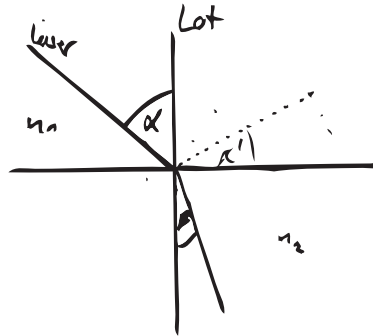
eo2-C

1 Auf dem Bild ist zu sehen, wie eine Stift (1), halb in Luft (2) und halb in Wasser (3), vermeintlich abknickt,
 2 wohingegen ein Stift (17), nur in Luft (2), keinen Knick (4) besitzt. Wir (5) nehmen die Lichtwellen (6) war,
 3 die vom Stift (1) reflektiert werden. Diese Lichtwellen (6) besitzen in jedem Medium (7,8), also hier Luft (2)
 4 und Wasser (3), einen anderen Brechungsindex (9, 10), der aus der unterschiedlichen Geschwindigkeit (11,
 5 12) des Lichtes (13) in jedem einzelnen Medium (7,8) resultiert. Ähnliches kennt man von einer Linse (14),
 6 die ebenfalls einen Brechungsindex (15) besitzt. Dadurch wird das Bild (16) verzerrt - was sich hier im Wasser
 7 (3) durch einen Knick (4) herausstellt.

eo4-A

- 1 Der abgebildete Laser (1) geht durch zwei Medien (2,3), die Luft (4) und das Wasser (5). Dabei sieht es
 2 so aus, als würde der Laserstrahl (1) an der Oberfläche (6) einfach abknicken, was auf die verschiedenen
 3 Brechungsindices (7,8) von Wasser (5) und Luft (4) zurückzuführen ist (n_1 (9), n_2 (10)). Da der Brechungs-
 4 index (7) n_1 (9) der Luft (4) größer ist als der Brechungsindex (8) n_2 (10) des Wassers (5), wird der Laser (1)
 5 zum Lot (11) hin gebrochen. Der Einfallswinkel (12) α (13) ist demnach größer als der Brechungswinkel
 6 (14) β (15) (siehe Skizze). Nicht abgebildet ist der reflektierte Laserstrahl.

Skizzen:



$$n_1 > n_2$$

$$\alpha > \beta$$

α = Einfallswinkel
 β = Brechungswinkel
 α' = Reflexionswinkel

Skizze des Probanden eo4 zum Bild A (Laserstrahl)

eo4-C

- 1 Im Foto sieht es so aus, als würde der Stift (1) nach dem Eintauchen (2) ins Wasser (3) abknicken. Dies
 2 ist eine optische Täuschung (4), die auf unterschiedliche Brechungsindices (5,6) von Wasser (3) und Luft
 3 (7) zurück-zuführen ist. Das Licht (8) wird an der Wasseroblerfläche (9) gebrochen, was im Kopf (10) des
 4 Betrachters (10) die Täuschung (4) hervorruft.

fo1-B

- 1 Das Licht (1) breitet sich in verschiedenen Medien (2) unterschiedlich aus. Dabei gilt es den optischen Weg
 2 (3) zu betrachten. Dieser (3) ergibt sich aus dem Produkt (4) des Brechungsindex (5) und des zurückgelegten
 3 Weges (6). Das Licht (1) sucht sich dabei immer den kürzesten optischen Weg (7). Dadurch erscheint wenn
 4 man einen speziellen Lichtstrahl (9) betrachtet dieser (9) geknickt. Da er (9) länger im Medium (10) mit
 5 dem kleineren Brechungsindex (11) bleibt. Legt man eine Münze (12) in Wasser (13) so scheint sie (12) ein
 6 etwas verschoben zu liegen im Vergleich (14) zu einem leeren Becken (15). Das Wasser (13) hat einen höheren
 7 Brechungsindex (16) als Luft (17). Daher wählt das Licht (1) einen weg (3) der möglichst senkrecht zur Wasser-
 8 oberfläche (18) steht um die Münze (12) zu erreichen. Das menschliche Auge (8) rekonstruiert aber das Bild
 9 (19) aus dem Verlauf (20) den der Lichtstrahl (9) hätte, wenn er (9) komplett gebrochen auf die Münze (12)
 10 fällt. Daher erscheint die Münze (12) leicht verschoben.

fo1-C

- 1 ~~Zur weiteren Verdeutlichung des Prinzip aus der Erklärung zu Foto B kann man auch einen Stift (1) in~~
2 ~~Wasser (2) halten. Das Licht (3) wird beim Eintreten (4) ins Wasser (2) gebrochen. Das Auge (5) konstruiert~~
3 ~~die Lage (6) des Stiftes (1) aus dem Verlauf (7) des gebrochenen Lichtstrahls (8). So sieht man (5) die Teile~~
4 ~~(9) des Stiftes (1) die (9) im Wasser (2) sind leicht verschoben. Diese Erscheinung (11) bemerkt man (5) am~~
5 ~~Besten an der Wasseroberfläche (12). Der Stift (1) erscheint geknickt.~~

fo2-B

- 1 ~~Auf diesem Foto sind zwei Boxen (1,2) zu sehen, die (1,2) jeweils mit einer Münze (3,4) bestückt worden~~
2 ~~sind. Eine Box (1) enthält jedoch Wasser (5). Aus dem Blickwinkel (6), aus dem das Foto aufgenommen~~
3 ~~wurde, erscheint die Münze (3) im Wasser (5) höher zu liegen, als die (4) in der leeren Box (2), obwohl beide~~
4 ~~(3,4) an der exakt gleichen Stelle (7) liegen. Dieses Phänomen (8) ist mit der Lichtbrechung (9) im Wasser~~
5 ~~(5) zu erklären. Die Lichtwellen (10) werden in einem bestimmten Winkel (11) an der Wasseroberfläche (12)~~
6 ~~gebrochen und dies erweckt so den Eindruck (13), als würde die Münze (3) höher liegen.~~

fo2-C

- 1 ~~Auf diesem Foto sind zwei Boxen (1,2) zu sehen, die (1,2) jeweils einen Bleistift (3,4) enthalten. Eine Box (3)~~
2 ~~wurde mit Wasser (5) gefüllt, die (2) andere nicht. Nun tritt eine optische Täuschung (6) ein, bei der (6) der~~
3 ~~Bleistift (3) im Wasser (5) 'genickt' aussieht. Das ist durch die Lichtbrechung (7) zu erklären. Die Lichtwellen~~
4 ~~(8) treffen auf die Wasseroberfläche (9) und werden dort in einem bestimmten Winkel (10) gebrochen.~~

go1-A

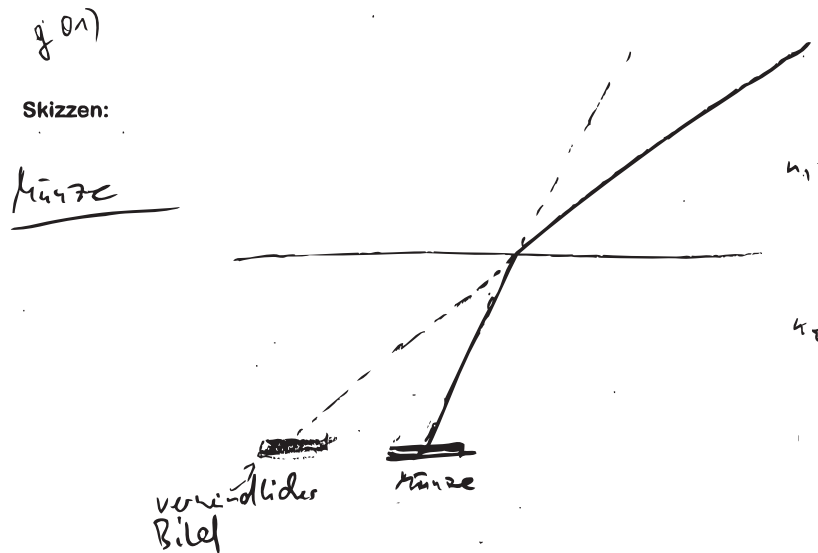
- 1 Wegen unterschiedlicher Brechungsindizes (1,2) n (3,4) in Luft (5) und Wasser (6) erfährt der Lichtstrahl (7)
2 an der Grenzfläche (8) Luft (5)-Wasser (6) eine Brechung (9) gemäß Snellius'schem Brechungsgesetz (10).
3 Wegen der unterschiedlichen Brechungsindizes (1,2) in Wasser (5) und Luft (6) erfolgt die Ausbreitung (11)
4 des Lichts (12) in Wasser (5) mit niedrigerer Geschwindigkeit (13) ($n_{\text{Wasser}}(4) > n_{\text{Luft}}(3)$). Wegen $s(14) = v \cdot t$
5 (15) benötigt das Licht (12) im Wasser (6) also mehr Zeit (16) um den gleichen Weg (17) zurück zu legen, als
6 in Luft (5). Das Fermat'sche Prinzip (18) besagt, dass ein Lichtstrahl (7) auf dem Weg (19) von A (20) (in Luft
7 (5)) nach B (21) (in Wasser (6)) den kürzesten Weg (22) zurück legt. Daraus lässt sich das Problem (23) als
8 Extremalaufgabe (24) lösen (mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (25) in den Medien (26)) und man
9 findet als Kürzesten Weg (22) den unter Brechung (9).

go1-B

- 1 Wiederrum aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes (1) erfolgt an der Grenzschicht (2) eine Richt-
2 ungsänderung (3) des Lichtstrahls (4). Der Lichtstrahl (4) wird bei Austritt (5) aus dem Wasser (6) nach
3 unten gekrümmt und es erscheint das Bild (7) nach vorne verschoben.

go2-A

- 1 ~~Auf diesem Foto ist die Brechung (1) eines Laserstrahls (2) von Luft (3) in Wasser (4) zu sehen. Der Strahl~~
2 ~~(2) wird gebrochen und zum Teil (5) reflektiert, weil sich die Brechungszahlen (6,7) von Luft (3) und Wasser~~



Skizze des Probanden g01 zum Bild B (Münze)

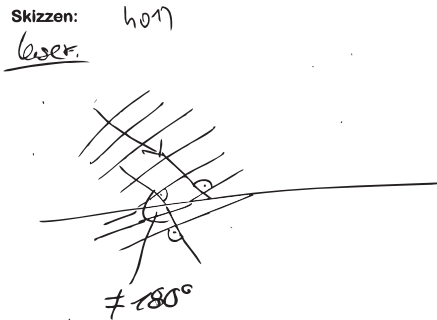
- 3 (4) unterscheiden. Am Brechungspunkt (8) kann man ein gedachtes Lot (9) senkrecht zur Wasseroberfläche
- 4 (10) einfügen. Somit kann man die Brechungszahlen (6,7) besser vergleichen. Der Einfallswinkel (11) über
- 5 der Wasseroberfläche (10) ist größer als der Brechungswinkel (12) unterhalb der Wasseroberfläche (10). Somit
- 6 wird der Strahl (2) zum Lot (9) gebrochen. Das bedeutet die Brechungszahl (6) von Luft (3) ist kleiner als
- 7 die (7) des Wassers (4).

g02-B

- 1 In diesem Bild sind zwei Gefäße (1,2) mit gleich positionierten Münze (3,4) abgebildet, wobei das linke
- 2 Gefäße (1) zusätzlich mit Wasser (5) gefüllt wurde. Es scheint so als würde die Münze (3) im Wasser (5) in
- 3 der Mitte (6) des Gefäßes (1) liegen, was aber nicht zutrifft. Der Grund (7) dafür ist, dass das Licht (8) im
- 4 wassergefüllten Gefäß (1) gebrochen wird, was im linken (2) nicht der Fall (9) ist, weil Licht (8) nur beim
- 5 Übergang (10) von zwei Medien (11) mit unterschiedlichen Brechungsahlen (12) gebrochen werden kann.

hor-A

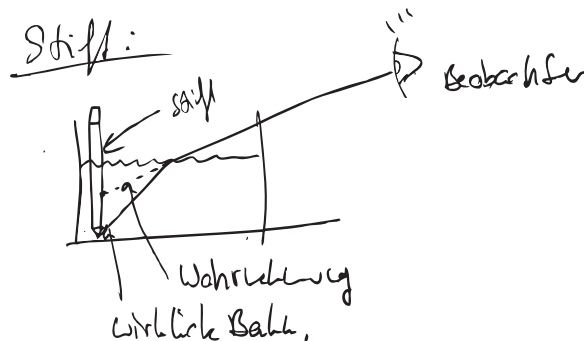
- 1 Das auf dem Foto zu sehende Phänomen (1) ist ein Effekt (2) der optischen Eigenschaften (3) der beiden
- 2 Materialien (4,5) Wasser (6) und Luft (7). Der Laserstrahl (8) der zunächst aus dem Laser (9) herauskommt
- 3 bewegt sich durch die Luft (7), trifft auf die Wasseroberfläche (10) auf, und bewegt sich anschließend durch
- 4 das Wasser (6). Entscheidend bei diesem Phänomen (1) ist, dass die Lichtgeschwindigkeit (11) in beiden
- 5 Materialien (4,5) unterschiedlich ist. Im Wasser (6) ist sie (11) kleiner als in der Luft (7). Daraus resultierend
- 6 bewegen sich die Phasenfronten (12) der elektromagnetischen Welle (13) (also des Lichts (14)) zunächst senk-
- 7 recht zur Ausbreitungsrichtung (15) in der Luft (7), treffen dann auf die Wasseroberfläche (10) und breiten
- 8 sich mit einer kleineren Geschwindigkeit (16) weiter aus (siehe Skizze). Daher breitet sich der Laserstrahl (8)
- 9 im Wasser (6) mit einer anderen Ausbreitungsrichtung (17) aus, und der Strahl (8) wird "gekrümmt". Das
- 10 Hygense Prinzip (18) der Ausbreitung (19) von Wellen (13) führt also hier zu diesem optischen Phänomen
- 11 (1).



Skizzen des Probanden hor zum Bild A (Laserstrahl)

hor-C

- 1 Betrachten wir (1) nun die Stifte (2) im Wasser (3), so lässt sich zunächst ebenfalls eine "Krümmung (4)" des
 2 Stiftes (2) im Wasser (3) (relativ zu dem (5), welche nicht im Wasser (3) liegt) feststellen. Dies kann auf den
 3 selben optischen Effekt (6) wie bereits die Krümmung (4) (oder auch Brechung (7)) des Laserstrahls (8)
 4 zurückgeführt werden. Das Gehirn (1) ist darauf "programmiert" Lichtstrahlen (9) als geradlinig anzusehen.
 5 Das heisst, das Mensch (1) ordnet dem ins Auge (1) einfallendem Licht (10) immer eine gerade Lichtbahn
 6 (11) zu. Nun verhält sich dies, bezogen auf den Stift (2) im Wasser (3), aber so, dass der Lichtstrahl (9) (wie
 7 zuvor erklärt) einen Knick (12) an der Wasseroberfläche (13) macht, und daher nicht mehr geradlinig verläuft.
 8 Das Gehirn (1) denkt hingegen, dass diese Strahlen (9) geradlinig verlaufen sind, und konstruiert daher das
 9 Bild (14), welches wir wahrnehmen, gerade so, dass es (1) annimmt, das die gebrochenen Lichtstrahlen (15)
 10 geradlinig verlaufen sind (siehe Skizze). Daher wirkt in unserer (1) Wahrnehmung (16) der Stift (2) ab der
 11 Wasseroberfläche (13) (also ab dem Punkt (17) an dem die vom Stift (2) kommenden Strahlen (9) unter dem
 12 einfluss (18) des optischen Effekt (6) sind) geknickt.



Skizzen des Probanden hor zum Bild C (Bleistift)

hor2-A

- 1 Auf dem Foto wird dargestellt, wie ein Lichtstrahl (1) (hier ein Laserstrahl (2)) von einem Medium (3)
 2 in ein anderes (4) eindringt und gebrochen wird. Hier zu sehen ist der Übergang (5) von dem Strahl (2)
 3 aus der Luft (6) mit einem Brechungsindex (7) von 1 in Wasser (8), was einen Brechungsindex (9) von
 4 1,33 besitzt. Es erfolgt also ein Durchgang (5) von einem dichteren (10) in ein dünneres Medium (11). Der
 5 Strahl (1) wird im Wasser (8) zum Lot (12) hingebrochen. Diese Winkeländerung (13) wird bestimmt mit
 6 der Gleichung (14): $\sin(\text{Einfallswinkel}) (15) \cdot n_1 (7) = \sin(\text{Brechungswinkel}) (16) \cdot n_2 (9)$. Beim

7 Übergang (5) vom dichten (10) zum dünnen Medium (11) wird der Strahl (1) folglich vom Lot (12) weg ge-
 8 brochen. Bei sehr großen Einfallswinkeln (17) kann es auch zu einer Totalreflektion (18) kommen. Das heißt,
 9 im Eintrittsmedium (10) ist der Strahl (1) gar nicht mehr zu sehen.

ho2-C

1 ~~Na was ist denn hier passiert?~~ Der Bleistift rechts (1) scheint ~~wie durch Zauberhand~~ gebogen worden. Wie
 2 ~~kann das denn passieren? Ein Zaubertrank?~~ Nein, das was uns (2) hier so täuscht ist reine Physik (3). Die
 3 Lichtstrahlen (4), die vom Bleistift (1) ausgehen und auf unser Auge (2) treffen, also ein Bild (5) in unserm
 4 Kopf (2) erzeugen, kommen aus dem Wasser (6) und in die Luft (7) in unser Auge (2). Diese unterschied-
 5 lichen Stoffe (8) haben unterschiedliche Brechungsindizes (9), die dafür sorgen, dass die Lichtstrahlen (4)
 6 abgelenkt werden beim Übergang (10) zwischen dem einen (11) ins andere Medium (12). Hier ist es der
 7 Übergang (13) von einem dichten Medium (14) in ein dünneres (15) zu sehen. Die Lichtstrahlen (4) werden
 8 nach dem Übergang (13) in die Luft (7) folglich nach oben, sprich vom Lot (16) weg gebrochen. Für uns (2)
 9 bedeutet das, der Bleistift (1) scheint sich zur Wasseroberfläche (17) hin zu biegen. Wenn wir (2) uns hingegen
 10 im Wasser (6) befänden und einen Bleistift (18) in der Hand (19) hielten, der zu einem Teil (20) durch die
 11 Wasseroberfläche (17) sticht, so würden wir (2) denken, er (18) würde zum Lot (16) hin gebeugt sein. Die
 12 Lichtstrahlen (21) des Stifts (18) in der Luft (7) treten also ins Wasser (6), werden gebeugt und gelangen
 13 in unser Auge (2).

ho3-A

1 ~~Das Bild A~~ stellt einen Laserstrahl (1) dar, welcher (1) in einem wassergefüllten Gefäß (3) gebrochen wird.
 2 Optisch erscheint es dem Betrachter (4), als hätte der Strahl (1) einen Knick (5). Dies lässt sich durch die
 3 unterschiedlichen Brechungsindize (6) der verwendeten Medien (7) erklären. Die Luft (8), welche (8) der
 4 Laserstrahl (1) zunächst passiert, besitzt einen Brechungsindex (9) von 1, das Wasser (10) in welches (10) der
 5 Strahl (1) anschließend eindringt dagegen ungefähr [Brechungsindex (2) von] 3. Daher wird der Einfallswin-
 6 kel (11) verändert, was zur optischen Täuschung (12) des Probanden (4) führt.

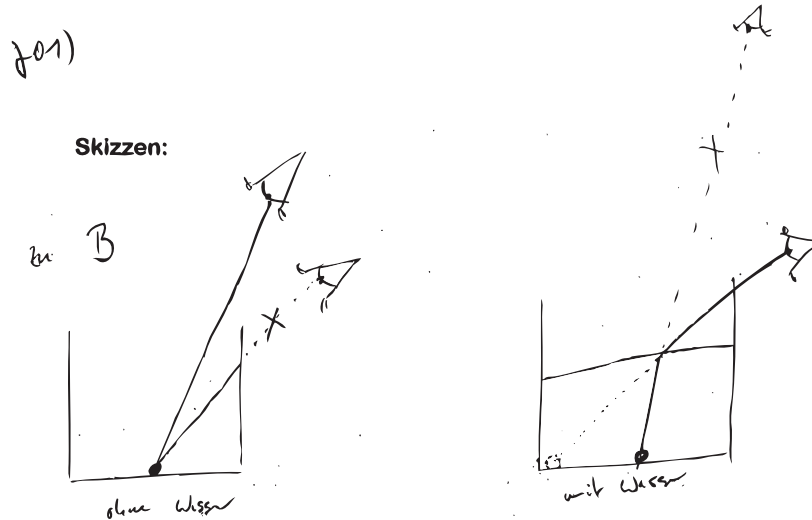
ho3-C

1 Das Sehvermögen (1) des menschlichen Auges (2) lässt sich wie folgt erklären: Lichtstrahlen (3) werden an
 2 den uns (4) umgebenden Gegenständen (5) reflektiert und gelangen so auf die Netzhaut (6) unseres (4)
 3 Auges (2), wo sie (3) als Information (7) an unser (4) Gehirn (8) weitergegeben wird. In Foto C entsteht da-
 4 bei eine optische Täuschung (9), da sich in beiden Gefäßen (10, 11) unterschiedliche Medien (12) befinden,
 5 passieren die Lichtstrahlen (3) verschiedene Brechungsindize (13). Im ersten Gefäß (10) befindet sich ledig-
 6 lich Luft (14), weshalb der Bleistift (15) grade erscheint. Im zweiten Gefäß (11) dagegen befindet er (16) sich
 7 sowohl in Luft (14) als auch in Wasser (17), da das Licht (18) nun zwei unterschiedliche Brechungsindizen
 8 (13) passieren muss, erscheint es dem Betrachter (4) als hätte der Bleistift (16) einen Knick (19).

jo1-B

1 Liegt eine Münze (1) in einem Kasten (2), können wir (3) diese (1) nur sehen, wenn sich das Licht (4) in
 2 einer Linie (5) von der Münze (1) in unser Auge (3) bewegen kann, ohne dabei von der Kastenwand (6)
 3 abgeschirmt zu werden. Liegt die Kastenwand (6) auf der geraden Linie (7) zwischen Münze (1) und Auge
 4 (3), so sehen wir (3) nur die Kastenwand (6), da sich das Licht (4) im Medium (8) Luft (9) nur gradlinig
 5 bewegen kann. Auch im Medium (10) Wasser (11) kann sich Licht (4) nur gradlinig bewegen. Trotzdem

- 6 wird eine Münze (12), die eigentlich von der Kastenwand (13) verdeckt wird, sichtbar, wenn die (12) mit
 7 Wasser (11) übergossen wird. Dies liegt daran, dass das Licht (4) an der Phasengrenze (14) gebeugt wird, und
 8 zwar, da Wasser (11) optisch dichter ist, vom Lot (15) weg. Licht (4), dass (4) also ansich viel weiter oben
 9 wahrgenommen werden sollte, kommt nun an einem Punkt (16) viel weiter unten an (siehe Skizze). Dies
 10 sorgt dafür, dass für den Beobachter (3) der Eindruck (17) entsteht, die Münze (12) läge an einem Punkt (18)
 11 viel weiter hinten im Kasten (19), weil sie (12) ja plötzlich für ihn (3) sichtbar wird und die Erfahrung (20)
 12 lehrt, dass man (3) nur Münze (12) sehen kann, die (12) so weit hinten liegen, dass wir (3) über die Wand (13)
 13 gucken können.



Skizze des Probanden j01 zum Bild B (Münze)

j01-C

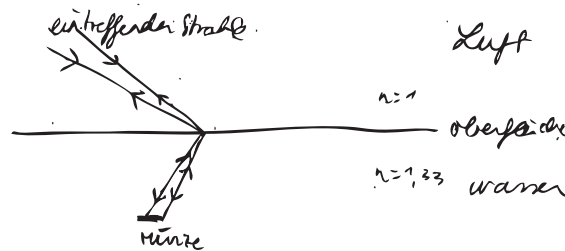
- 1 In optisch dichteren Medien (1) breitet sich das Licht (2) langsamer aus, als im Vakuum (3) oder der Luft (4).
 2 Wasser (5) ist so ein optisch dichteres Medium (1). Befindet sich ein Stift (6) anteilig im Wasser (5), so bewegt
 3 sich das Licht (7) des Teiles (8) des Stiftes (6), der unter Wasser (5) liegt, im Wasser (5) langsamer. Trifft es (7)
 4 nun auf die Grenzfläche (9), so ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit (10). Stellt man sich das Licht
 5 (7) an diesem Punkt (11) als Wellenfront (12) vor, die (12) sich in Elementarwellen (13) entwickelt, so haben
 6 die ersten Elementarwellen (14) länger Zeit (15), sich auszubereiten, als die letzten (16). Im Resultat (17)
 7 knickt die Wellenfront (12) vom Lot (18) weg, das Licht (7) wird gebeugt. Das Licht (7), das (7) sich vom
 8 unter Wasser (5) befindlichen Teil (8) des Stiftes (6) auf unser Auge (19) zubewegt, bewegt sich also nicht
 9 gradlinig, sondern wird an der Phasengrenze (20) geknickt. Dies führt dazu, dass der Stift (6) als solches
 10 geknickt scheint, und zwar vom Lot (18) weg, ganz entsprechend der Richtung (21) des Knickes (22) im Licht
 11 (7).

j02-B

- 1 Auf dem Bild sieht man (1) wieder zwei viereckige Behälter (2,3) mit je einer Münze (4,5). Der rechte (2) ist
 2 gefüllt mit Wasser (6) und es sieht so aus, als liege die Münze (4) eher in der Mitte (7) des Behälters (2) wo
 3 man (1) sie (4) komplett sehen kann während man (1) sie (5) links nur zur Hälfte (8) sieht. Die Münze (4,5)
 4 liegen aber eigentlich an der selben Stelle (9) in den Behältern (2,3). Warum sieht man (1) die rechte Münze
 5 (4) verschoben? Dies hat mit der Lichtbrechung (10) zu tun. Die eintreffende Lichtstrahlen (11) werden

- 6 an der Oberfläche (12) Luft (13)-Wasser (6) z. T. gebrochen, weil Wasser (6) und Luft (13) unterschiedliche
 7 Brechzahlen (14) haben. Somit erreichen die Strahlen (11) den Teil (15) der Münze (4), der im rechten Behälter
 8 (3) nicht zu sehen ist. da alle Strahlen (16) dann verschoben werden, sieht man (1) die Münze (4) komplett
 9 und auch verschoben im Behälter (2). Siehe Skizze.

Skizzen: ^{zum} Photo B



Skizze des Probanden jo2 zum Bild B (Münze)

jo2-C

- 1 Es sind zwei viereckige Behälter (1,2) mit je einem Bleistift (3,4) zu sehen. Der linke (1) ist leer, der rechte (2)
 2 gefüllt mit Wasser (5). Im linken (1) sieht man (6) den Stift (3) normal, also gerade. Im rechten (2) sieht
 3 man (6) den Stift (4) ungerade, als wäre er (4) ab der Wasseroberfläche (7) leicht gebrochen. Dies pas-
 4 siert wegen Lichtbrechung (8). In der Tat wird ein Lichtstrahl (9) an der Oberfläche (10) zwischen zwei
 5 unterschiedlichen Medien (11) z. T. reflektiert aber auch gebrochen. Das Licht (12), das (12) auf dem Stift (4)
 6 eintrifft und von dem (4) wieder reflektiert wird bis zu unserem Auge (6) wird an der Lichtoberfläche (10)
 7 gebrochen, weil Wasser (5) und Luft (13) unterschiedliche Brechzahlen (14,15) haben (Wasser (5) 1,33 und
 8 Luft (13) 1). Somit gleicht der Winkel (16) zwischen eintreffender Lichtstrahl (17) an der Oberfläche (10)
 9 Wasser (5)-Luft (13) und Lot (18), dh. Senkrechte zur Oberfläche (10), nicht dem Winkel (19) zwischen Lot
 10 (18) und dem herauskommenden Strahl (20): das Licht (12) wurde gebrochen. Deswegen sehen wir (6) ein
 11 Bild (21) das nicht realitätsgemäss ist, sondern der Stift (4) sieht ungerade aus, was er (4) in der Wirklichkeit
 12 (22) nicht ist.

jo4-B

- 1 Das gegebene Foto illustriert den Effekt (1) der optischen Brechung (2). Auf dem Bild sind zwei Münzen
 2 (3,4) in Boxen (5,6) zu erkennen. Eine Box (5) ist zusätzlich mit Wasser (7) befüllt. Die Münzen (3,4) sind
 3 unterschiedlich in den Boxen (5,6) platziert. In der rechten Box (5) fällt es dem Betrachter (8) deutlich schwie-
 4 riger die tatsächliche Platzierung (9) der Münze (3) in der Box (5) zu erkennen. Der Effekt (1) der für diese
 5 Schwierigkeit (10) verantwortlich ist heisst optische Brechung (2). das Licht (11) das (11) von der Münze (3)
 6 reflektiert wird und ins Auge (8) des Betrachters (8) fällt durchläuft in der rechten Box (5) verschiedene
 7 Medien (12) (Wasser (7) und Luft (13)). Beim Austritt (14) aus dem dichteren Medium (15) (Wasser (7)) in
 8 das weniger dichte Medium (16) (Luft (13)) wird das Licht (11) an der Grenze (17) zwischen den Medien (12)
 9 gebrochen. Bei dieser Brechung (2) wird der von der Münze (3) kommende Lichtstrahl (18) in Richtung (19)

- 10 der Trenngrenze (17) der Medien (12) abgelenkt. Dadurch erscheint die Münze (3) im Auge (8) des Betrachters
11 (8) versetzt.

j04-C

- 1 ~~Das gegebene Foto~~ illustriert den Effekt (1) der optischen Brechung (2). ~~Auf dem Bild~~ sind zwei Stifte (3,4)
2 in Boxen (5,6) zu erkennen. Die rechte Box (5) ist zusätzlich mit Wasser (7) befüllt, sodass der Stift (3) ca
3 bis zur Hälfte (8) in Wasser (7) steht. In der rechten Box (5) scheint der Stift (3) einen Knick (9) zu haben.
4 Der Effekt (1) der für diese Illusion (10) verantwortlich ist heißt optische Brechung (2). Das Licht (11) das
5 vom unteren Teil (12) des Stiftes (3) reflektiert wird und ins Auge (13) des Betrachters (13) fällt durchläuft
6 in der rechten Box (5) verschiedene Medien (14) (Wasser (7) und Luft (15)). Beim Austritt (16) aus dem
7 dichteren Medium (17) (Wasser (7)) in das weniger dichte Medium (18) (Luft (15)) wird das Licht (11) an
8 der Grenze (19) zwischen den Medien (14) gebrochen. Bei dieser Brechung (2) wird der von der Münze (23)
9 kommende Lichtstrahl (20) in Richtung (21) der Trenngrenze (19) der Medien (14) abgelenkt. Während das
10 vom oberen Teil (22) reflektierte Licht (11) nicht gebrochen wird. Dadurch erscheint der Stift (3) im Auge
11 (13) des Betrachters (13) geknickt..

x01-A

- 1 Das Verhalten (1) von Licht (2) lässt sich mit Hilfe von Strahlen (3) modellieren. Vom Laser (4) geht eine
2 Vielzahl (5) von Strahlen (3) aus. Innerhalb des homogenen Mediums (6) Luft (7) verlaufen Lichtstrahlen
3 (3) immer geradlinig. Die Strahlen (3) eines Lasers (4) verlaufen zudem parallel. Trifft ein Strahl (3) auf ein
4 Staubpartikel (8) in der Luft (7), so gehen vom Punkt (9) des Auftreffens (10) viele neue Strahlen (11) aus. Die
5 Strahlen (11) dieses gestreuten Lichts (12) laufen in alle Raumrichtungen (13) auseinander. Ein Teil (14) dieser
6 Strahlen (11) erreicht das Auge des Beobachters (15). (Die Linse (16) des Auges (15) lenkt die Strahlen (3) eines
7 Ursprungspunktes (17) so ab, dass sie (3) auf einen Bildpunkt (18) auf der Netzhaut (19) zusammenlaufen.)
8 Unzählige Staubpartikel (8) werden von den geradlinig laufenden Laserlichtstrahlen (3) getroffen und es
9 entsteht eine Spur (20) von Punkten (21), von denen (21) jeweils Strahlen (11) in alle Raumrichtungen (13)
10 divergieren.
11 Im weiteren Verlauf (22) treffen die Strahlen (3) des Laserlichts (2) auf die Oberfläche (23) des Wassers (24).
12 Entsprechend den Regeln (25) des Brechungsgesetzes (26) werden die Strahlen (3) schlagartig zum Lot (27)
13 (auf der Wasseroberfläche (23)) hin abgelenkt. Innerhalb des homogenen Mediums (6) Wasser (24) verlaufen
14 die Strahlen (3) wieder geradlinig. Auch im Wasser (24) befinden sich streuende Partikel (28), also Ursprünge
15 (29) divergierender Strahlen (30). Ein Teil (31) dieser Strahlen (30) verläuft dabei in Richtung (32) des Auges
16 (15). Die Strahlen (31) durchstoßen die Seitenwand (33) des Aquariums (34), also die Grenzflächen (35) von
17 Wasser (24) nach Glas (36) und von Glas (36) nach Luft (7). Weil die Strahlen (31), die auf das Auge (15)
18 treffen, in der abgebildeten Konstellation (37) die Grenzflächen (35) nahezu senkrecht durchlaufen, findet
19 entsprechend dem Brechungsgesetz (26) auch keine relevante Brechung (38) an diesen Stellen (39) statt.

x01-B

- 1 Das Verhalten (1) von Licht (2) lässt sich mit Hilfe von Strahlen (3) modellieren. Von den Münzen (7,8)
2 in beiden Aquarien (9, 10) gehen Lichtstrahlen (11, 12) aus. ~~Betrachtet man~~ einen beliebigen Punkt (13) auf
3 einer Münze (14), so geht von diesem (13) eine Vielzahl (15) von Strahlen (3) in alle Raumrichtungen (4) aus.
4 Innerhalb des jeweiligen, homogenen Mediums (16) verlaufen die Strahlen (3) immer geradlinig. Im linken
5 Aquarium (9) ist das die Münze (7) umgebende Medium (17) Luft (5) und im rechten (10) (18=) Wasser (6).
6 Einige Strahlen (3) erreichen das Auge (19) des Beobachters (20). (Die Linse (21) des Auges (19) lenkt die

- 7 Strahlen (3) eines Ursprungspunktes (22) so ab, dass sie (3) auf einen Bildpunkt (23) auf der Netzhaut (24)
 8 zusammenlaufen.)
- 9 Im Fall des linken, luftgefüllten Aquariums (9) können nur Strahlen (25), die ihren Ursprung (26) im
 10 hinteren Teil (27) der Münze (7) haben, das Auge (19) erreichen. Strahlen (28) vom vorderen Teil (29) der
 11 Münze (7), die in Richtung (30) des Auges (19) ausgerichtet sind, treffen lediglich auf die Innenseite (31) der
 12 weißen Aquariumswand (32). Deshalb ist die Münze (7) nur halb zu sehen.
- 13 Im Fall des rechten, mit Wasser (6) gefüllten Aquariums (10) ändern die Strahlen (12) entsprechend dem
 14 Brechungsgesetz (33) an der Grenzfläche (34) schlagartig ihre Richtung (35). Für den Wechsel (36) von Wasser
 15 (6) nach Luft (5) werden die Strahlen (12) vom Lot (37) (auf der Grenzfläche (34)) weg gebrochen (, bis
 16 auf den senkrechten, unveränderlichen Fall (38)). D.h., dass die von der Münze (8) zur Grenzfläche (34)
 17 gerichteten Strahlen (12) nach dem Medienwechsel (36) flacher verlaufen. Strahlen (12), die das Auge (19)
 18 erreichen, sind innerhalb des Wassers (6) nicht zum Auge (19) hin ausgerichtet, sondern steiler. Nach der
 19 Grenzfläche (34) verlaufen sie (12) flacher und dann in Richtung (35) des Auges (19). Die Strahlen (12) eines
 20 Ursprungspunktes (22) scheinen für das Auge (19) nicht von diesem (22), sondern von einem höher ge-
 21 legenen (und etwas zum Auge (19) hin versetzten) Ursprung (39) zu kommen. Da dies für alle Punkte (22)
 22 auf der Münze (8) gilt, erscheint sie (8) insgesamt nach oben (und etwas nach vorn) verschoben zu sein. Die
 23 Münze (8) ist in diesem Aquarium (10) vollständig zu sehen, weil es für jeden Punkt (22) auf der Münze (8)
 24 einige Strahlen (12) gibt, die das Auge (19) auf diese Weise (40) erreichen.

x01-C

- 1 Das Verhalten (1) von Licht (2) lässt sich mit Hilfe von Strahlen (3) modellieren. Von den Bleistiften (4,5) in
 2 beiden Aquarien (6,7) gehen Lichtstrahlen (3) aus. Betrachtet man (8) einen beliebigen Punkt (9) auf einem
 3 Stift (10), so geht von diesem (9) eine Vielzahl (11) von Strahlen (3) in alle Raumrichtungen (12) aus. Inner-
 4 halb des jeweiligen, homogenen Mediums (13) verlaufen die Strahlen (3) immer geradlinig. Ausgehend von
 5 den Punkten (14) eines Stiftes (10), die (14) sich im Medium (13) Luft (15) befinden, verlaufen einige Strahlen
 6 (16) in Richtung (17) des Auges (8) des Beobachters (8). (Die Strahlen (3) eines Ursprungspunktes (18) wer-
 7 den dabei von der Augenlinse (19) auf einen Bildpunkt (20) auf der Netzhaut (21) zusammengeführt.) Im
 8 Fall des linken Aquariums (6) durchlaufen jene Strahlen (22), die das Auge (8) erreichen, ausschließlich das
 9 Medium (13) Luft (15), im rechten Aquarium (7) teilweise auch Wasser (23). An der Grenzfläche (24) von
 10 Wasser (23) und Luft (15) ändern diese Strahlen (22) entsprechend dem Brechungsgesetz (25) schlagartig
 11 ihre (22) Richtung (26). Für den Wechsel (27) von Wasser (23) nach Luft (15) werden die Strahlen (22) vom
 12 Lot (28) (auf der Grenzfläche (24)) weg gebrochen (, bis auf den senkrechten, unveränderlichen Fall (29).
 13 D.h., dass die vom unteren Teil (30) des Stiftes (5) zur Grenzfläche (24) gerichteten Strahlen (22) nach dem
 14 Medienwechsel (27) flacher verlaufen. Strahlen (22), die das Auge (8) erreichen, sind innerhalb des Wassers
 15 (23) nicht zum Auge (8) hin ausgerichtet, sondern steiler. Nach der Grenzfläche (24) verlaufen sie (22) fla-
 16 cher und dann in Richtung (17) des Auges (8). Strahlen (22) eines Ursprungspunktes (18) scheinen für das
 17 Auge (8) nicht von diesem (18), sondern von einem höher gelegenen (und etwas zum Auge (8) hin versetz-
 18 ten) Ursprung (31) zu kommen. Da dies für alle Ursprungspunkte (18) unter Wasser (23) gilt, erscheint der
 19 Stift (5) insgesamt nach oben (und leicht nach vorn) geknickt zu sein.

20 x02-A

- 1 Ein Lichtbündel (1) trifft auf eine optische Grenzfläche (2) und wird in seiner (1) Ausbreitungsrichtung (3)
 2 (zum Lot (4)) hin geändert.

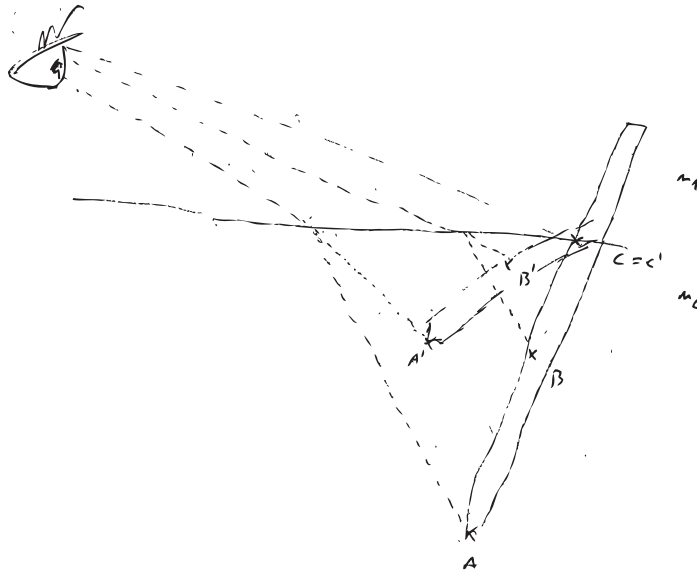
3 Licht (5) hat in Medien (6) charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten (7). Trifft ein Lichtbündel (1)
 4 auf eine Grenze (8) zwischen zwei Medien (9,10), so ändert sich diese Geschwindigkeit (7). Im Vakuum
 5 (11) ist die Lichtgeschwindigkeit (7) maximal, in erster Näherung (12) gilt, dass die Lichtgeschwindigkeit (7)
 6 mit der Dichte (13) des Medium (6) abnimmt (es gibt aber Ausnahmen (14)). Nach dem Huygensschen
 7 Prinzip (15) ergibt sich aus der Änderung (16) der Lichtgeschwindigkeit (7) an der Mediengrenze (8) eine
 8 Richtungsänderung (17). Das Huygenssche Prinzip (15) ist eine Modellierung (18), die das Lichtbündel (1)
 9 idealisiert als Ausbreitung (19) einer ebenen Wellenfront (20) beschreibt. Dabei wird diese (20) zusammen-
 10 gesetzt aus so genannten Elementarwellen (21) beschrieben, deren Einhüllende (22) die Wellenfront (20)
 11 ergibt. Trifft nun eine solche ebene Wellenfront (20) (oBdA von einem dünneren Medium (23)) unter ei-
 12 nem Winkel (27) auf eine ebenfalls ebene Mediengrenze (8) (zu einem dichteren Medium (24)), so breiten
 13 sich die Elementarwellen (21) im dichteren Medium (24) langsamer aus, als im weniger dichten Medium (23).
 14 Setzt man nun die Elementarwellen (21) zusammen, so ergibt sich aus geometrischen Betrachtungen (25) ei-
 15 ne Richtungsänderung (17) in der Ausbreitung (19) der Wellenfront (20). In dem beschriebenen Fall (26)
 16 ist die Richtungsänderung (17) zum Lot (4) hin gerichtet. Im dichteren Medium (24) pflanzt sich die Welle
 17 (21) wieder geradlinig fort.

x02-C

1 In Teil I (1) fällt das Licht (2) von allen Stellen (3) des Stiftes (4) ohne erliden einer Richtungsänderung (5)
 2 (kein Medienwechsel (6)) direkt ins Auge (7). Der Stift (4) erscheint in seiner realen Form (8), wie ich (7) sie
 3 (8) auch ertasten würde.
 4 In Teil II (9) ragt der Stift (10) in ein Medium (11) größerer optischer Dichte (12) hinein. Für den Teil (13)
 5 des Bleistifts (10), der außerhalb des Wasser (14) ist, gilt die Ausführung (15) wie oben. Licht (16), das (16)
 6 von den Stellen (17) des Stifts (10) ausgesendet wird, die (17) sich im Medium (11) befinden, erfährt eine
 7 Richtungsänderung (5). Analog zum Vorgang wie in Abbildung D) beschrieben, nimmt das Auge (7) den
 8 Punkt (z.B. A) (18) an einer anderen Stelle (31) wahr, als sich A (18) befindet. In der Geometrie (20) dieses
 9 Aufbaus (21) erscheint die Spitze (22) des Stifts (10) oberhalb (in erster Näherung (29)) an der Stelle A' (23).
 10 Diese Überlegung (24) lässt sich für jeden beliebigen Punkt (25) (z.B. B (26)) anstellen, der (25) sich auf dem
 11 Stift (10) im Medium n_2 (11) befindet. Dabei stellt man (7) fest, die Hebung (27) $P(28) \rightarrow P'(29)$, hängen
 12 von der Tiefe (30) des Punkts P (28) unterhalb der Mediengrenze (32) ab. Das wahrgenommene Bild (33) des
 13 Bleistifts (10) ergibt sich dann aus der Summe (34) der Bilder (35) aller Punkte (25). Der Stift (10) erscheint
 14 deshalb im Punkt C (36) auf der Mediengrenze (32) geknickt. Oberhalb findet gar keine Hebung (27) statt,
 15 unterhalb findet Hebung (27) statt.

x03-A

1 In der ersten Abbildung ist ein Laserstrahl (1) von der Seite (2) zu sehen, wie er (1) von schräg oben in ein
 2 Aquarium (3) hineinleuchtet. Beim Eintauchen (4) ins Wasser (5) knickt er (1) zum Lot (6) der Wasserober-
 3 fläche (7) hin ab und verläuft dann geradlinig weiter bis zum Aquariumsboden (8).
 4 In Bezug (9) auf das Abknicken (10) des Laserstrahles (1) selbst gibt es mit dem Strahlenmodell (11) des
 5 Lichtes (12) nichts (13) zu erklären. Denn der Laserstrahl (1) kann als ein schmales Lichtstrahlbündel (14)
 6 aufgefasst werden und für Lichtstrahlen (15) gilt die Brechung (16) an Grenzflächen (17) gemäß dem Snellius-
 7 schen Gesetz (18). Darüber allerdings, dass der abknickende Laserstrahl (1) gerade so, wie auf dem Foto abge-
 8 bildet, sichtbar ist, kann mit dem Lichtstrahlmodell (11) umfänglicher gesprochen werden: Das Laserlicht-
 9 bündel (14) wird sowohl an der Luft (19) als auch am Wasser (5) gestreut. Von allen Stellen (20), die es (14)
 10 passiert, werden daher Lichtstrahlen (15) in die Umgebung (21) ausgesandt, von denen (15) einige (22) die



Skizze des Probanden x02 zum Bild C (Bleistift)

- 11 Augen des Betrachters (23) erreichen. Diejenigen Lichtstrahlen (22), die (22) von den Laserstellen (20) im
 12 Wasser (5) ausgehen, werden beim Austreten (24) an der Vorderseite (25) des Aquariums (3) zwar selbst wie-
 13 der gebrochen, aber da sie (22) fast senkrecht auf die Grenzfläche (26) treffen, ist diese Brechung (16) so
 14 gering, dass sie (16) hier auf der abgebildeten Ansicht keinerlei Auswirkungen (27) zeigt.

x03-B

- 1 In der zweiten Abbildung sind links ein Terrarium (1) und rechts ein Aquarium (2) gleicher Größe (3) zu
 2 sehen, in die (1, 2) von oben hineingeschaut wird und auf deren (1, 2) Böden (4, 5) jeweils eine Münze (6, 7)
 3 liegt. Die Münzen (6, 7) liegen vermutlich tastbar in gleichen Entfernungen (37) von der Vorderkante (8)
 4 des Terrariums (1) bzw. des Aquariums (2). Die Münze (7) im Aquarium (2) wird jedoch deutlich hinter
 5 derjenigen (6) im Terrarium (1) gesehen. Das trifft auch auf die hintere Bodenkante (9) des Aquariums (2)
 6 im Vergleich (10) zu derjenigen (11) des Terrariums (1) zu: sie (9) scheint in die Ferne (12) verschoben zu sein.
 7 Dass die senkrechten Kanten (13) des Aquariums (2) allerdings gerade und ungeknickt gesehen werden –
 8 ob sie (13) nun unter oder über dem Wasserspiegel (14) liegen –, deutet allerdings darauf hin, dass hier der
 9 gesamte unter Wasser (15) liegende Boden (5) des Aquariums (2) mitsamt der auf dem Boden (5) liegenden
 10 Münze (7) senkrecht zur Wasseroberfläche (14) hin gehoben gesehen wird.
- 11 Von jeder Stelle (16) der Münze (6) im Terrarium (1) breiten sich geradlinig Lichtstrahlen (17) in alle Richt-
 12 ungen (18) aus. Ein Teil (19) davon gelangt ins Auge des Beobachters (20) und wird in der Augenlinse (21)
 13 so gebrochen, dass sich die Münze (4) auf der Netzhaut (22) abbildet. Deshalb „wird sie (6) dort gesehen,
 14 wo sie (6) auch tastbar liegt“. Bei der Münze (7) im Aquarium (2) liegt die Sache (38) etwas anderes. Auch
 15 hier breiten sich zwar von jeder ihrer (7) Stellen (23) Lichtstrahlen (24) in alle Richtungen (18) aus, aber
 16 beim Durchqueren (25) der Wasseroberfläche (14) werden diese (24) gebrochen. Die für den eingenommen
 17 Blickwinkel (26) auf die Wasseroberfläche (14) interessierenden Strahlen (27) werden gemäß des Snellius-
 18 schen Gesetzes (28) vom Lot (29) weggebrochen. Das hat zur Folge (30), dass nicht etwa die gleichen von
 19 der Münze (7) herkommenden Lichtstrahlen (17) das Auge (20) erreichen wie im Terrariumsfall (31), son-
 20 dern solche (27), die (27) ohne die Brechung (32) an der Wasseroberfläche (14) über den Betrachter (20)
 21 hinweggeleuchtet hätten. Denn diese (24) knicken jetzt nach unten ab und erreichen das Auge (20) (wäh-

22 rend die anderen Strahlen (17), die zuvor das Auge (20) erreicht haben unter ihm (20) hindurch leuchten).
 23 Diese Strahlen (27), die im Aquariumsfall (33) das Auge (20) erreichen, durchqueren die Wasseroberfläche
 24 (14) aber deutlich hinter den vergleichbaren Strahlen (17) des Terrariumsfalles (31). Und deswegen scheint
 25 die Münze (7) im Aquarium (2) hinter derjenigen (6) im Terrarium (1) zu liegen. Für die Gesamtheit (34) des
 26 Sichtinhaltes (35) des Aquariums (2) gilt aus geometrischen Gründen (36) das er (35) zur Wasseroberfläche
 27 (14) hin zusammengestaucht, also gehoben gesehen wird. Die rechte Münze (7) liegt also dreidimensional
 28 betrachtet höher als die linke (6), aber zweidimensional betrachtet eben hinter der linken (6).

x03-C

1 ~~In der dritten Abbildung~~ sind links ein Terrarium (1) und rechts ein Aquarium (2) gleicher Größe (3) zu
 2 sehen, in die von oben hineingeschaut wird und vor deren hinteren Wänden (4, 5) jeweils schräg ein Stift
 3 (6, 7) lehnt. Der Stift (7) im Aquarium (2) knickt an der Wasseroberfläche (8). Der gesamte Teil (9) von ihm
 4 (7), der unter Wasser (10) liegt, ist nach oben hin verschoben.
 5 Beim Vergleich (11) der beiden Stifte (6, 7) fällt auf, dass zweidimensional betrachtet alle Stellen (12) des
 6 fraglichen, abgeknickten Teiles (9) des unter Wasser (10) liegenden Stiftes (7) im Aquariumsfall (13) hinter
 7 den vergleichbaren Stellen (14) des Stiftes (6) im Terrariumsfall (15) liegen. Auf jede dieser Stellen (12) trifft
 8 genau das Gleiche (16) zu, wie auf die Münze (17) in Situation ii). Man (21) kann sich die Stifte (6, 7) vor-
 9 stellen als zusammengesetzt aus vielen kleinen Münzen (17). Oder anders: Ein schräger Münzenstapel (18)
 10 in Situation ii) würde aus den oben beschriebenen Gründen (19) genau das gleiche Abknickverhalten (20)
 11 zeigen wie der Stift (7) in Situation iii).

F.2 KODIERUNGEN

aoI-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für aoI-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Licht		3	e1	2	(ist zwischen ... und ...)	3, 4	1
2	Grenzfläche		3	e2	1	fällt auf	2	1
3	Stoff 1		2	e3	5	lassen sich beobachten	5	1
4	Stoff 2		2	e4	1	hat	6	1
5	charakteristische Brechungsphänomene		2	e5	5	können als Bsp. verstanden werden für	6	1
6	Wellennatur		3	e6	1	hat	8	1
7	Ursache		3	e7	1	hat	9	1
8	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1)	typische Lichtgeschw. 1	3	e8	8	(ist) unterschiedlich (zu)	9	1
9	Ausbreitungsgeschwindigkeit (2)	typische Lichtgeschw. 2	3	e9	8	ist typisch für	3	1
10	stofflicher Aufbau		3	e10	9	ist typisch für	4	1
11	Vakuumlichtgeschwindigkeit		3	e11	43,44	... (und) ... haben	10	1
12	Strahlenoptik		3	e12	8, 9	sind geringer als	11	1
13	Brechungswinkel		3	e13	13	kann berechnet werden mit Hilfe von	14	1
14	Snellius'sches Brechungsgesetz		3	e14	15, 16	werden in gesetzt in	21	1
15	Einfallswinkel		3	e15	19	ist gleich	20	0
16	Ausfallswinkel		3	e16	24	hat	23	1
17	Brechungskoeffizient (1)		3	e17	22	wird gebrochen in	23	1
18	Brechungskoeffizient (2)		3	e18	25	(führt) zu	27	1
19	$\sin(\theta_1)/\sin(\theta_2)$		3	e19	25	(entspricht)	29	1
20	n_1/n_2		3	e20	22	(wird gebrochen weg von)	24	1
21	Beziehung		3	e21	30	steht senkrecht auf	31	1
22	Strahl		3	e22	32	hat	31	1
23	Richtung (1)	(Richtung zum Lot)	3	e23	33	tritt nicht zusätzlich auf	33	1
24	Lot		3	e24	35	werden gestreut vom	34	1
25	Übergang 1		3	e25	42	hat	36	1
26	dünneres Medium	dünn	3	e26	37	(ist zwischen ... und ...)	34, 38	1
27	dichteres Medium	dicht	3	e27	40	(ist zwischen ... und ...)	38, 39	1
28	Übergang 2		3	e28	15	ist hier o	15	1
29	n_1 kleiner als n_2		3	e29	32	trifft auf	34	1
30	Beobachtungswinkel	(Blickrichtung)	2	e30	33	tritt auf an	41	1
31	Ausbreitungsrichtung		3	m1	e2	(wenn) dann	e3	1
32	Laserstrahl	gebündelter Laser	2	m2	e6	in	43	1
33	Brechung		3	m3	e7	in	44	1
34	Wasser		2	m4	e8	ist	7	1
35	Photonen		3	m5	m4	für	e3	1
36	Richtung (2)	(Richtung zum Beobachter)	2	m6	e11	führt zu ... (und) ...	e9, e10	1
37	Grenzfläche (1)	(Wasser / Glas)	3	m7	e13	in	12	1
38	Glas		2	m8	e14	über ... (und) ...	17, 18	1
39	Luft		2	m9	m8	durch	14	1
40	Grenzfläche (2)	(Glas / Luft)	3	m10	21	(ist)	e15	0
41	einige Stelle		2	m11	e18	von	26	1
42	Beobachter		2	m12	m11	dann	e17	1
43	Medium (1)		3	m13	e20	bei	28	1
44	Medium (2)		3	m14	e23	da	e21	0
				m15	e24	in	36	1
				m16	e24	gehen durch ... (und) ...	37, 40	1
				m17	e23	wenn	m16	1
				m18	m17	da	e28	1
				m19	e30	daher dort wo	e29	1
				m20	m6	jedoch	e12	1

aoi-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für aoi-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Licht (allg.)	(allgemein)	3	e1	2	(ist zwischen ... und ...)	3, 4	1
2	Grenzfläche (1)		3	e2	1	fällt auf	2	1
3	Stoff (1)		2	e3	5	lassen sich beobachten	5	1
4	Stoff (2)		2	e4	1	hat	6	1
5	charakteristische Brechungsphänomene		3	e5	5	können als Bsp. verstanden werden für	6	1
6	Wellennatur		4	e6	1	hat	8	1
7	Ursache		3	e7	1	hat	9	1
8	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1)		3	e8	8	(ist) unterschiedlich (zu)	9	1
9	Ausbreitungsgeschwindigkeit (2)		3	e9	8	ist typisch für	3	1
10	stofflicher Aufbau		3	e10	9	ist typisch für	4	1
11	Vakuumslichtgeschwindigkeit		4	e11	40, 41	... (und) ... haben	10	1
12	Strahlenoptik		3	e12	8, 9	sind geringer als	11	1
13	Brechungswinkel		3	e13	13	kann berechnet werden mit Hilfe von	14	1
14	Snellius'sches Brechungsgesetz		3	e14	15, 16	werden in gesetzt in	21	1
15	Einfallswinkel		3	e15	19	ist gleich	20	0
16	Ausfallswinkel		3	e16	24	hat	23	1
17	Brechungskoeffizient (1)		3	e17	22	wird gebrochen in	23	1
18	Brechungskoeffizient (2)		3	e18	25	(führt) zu	27	1
19	$\sin(\theta_1)/\sin(\theta_2)$		3	e19	25	(entspricht)	39	1
20	n_1/n_2		3	e20	22	(wird gebrochen weg von)	24	1
21	Beziehung		3	e21	29	liegt in ... (und) ...	30, 31	1
22	Strahl		3	e22	31	ist gefüllt mit	31	1
23	Richtung (1)	(zum Lot)	3	e23	1	wird reflektiert in	33	1
24	Lot		3	e24	34	hat (/ist in)	33	1
25	Übergang (1)	(von dünn zu dicht)	3	e25	32	hat	35	1
26	dünneres Medium		3	e26	1	wird gebrochen an	35	1
27	dichteres Medium		3	e27	28	ist von dicht zu dünn	28	1
28	Übergang (2)	(von dicht zu dünn)	3	e28	1	wird gebrochen weg von	24	1
29	Münze		2	e29	38	(unterliegen)	37	1
30	Box (1)	(leer)	2	e30	29	liegt tatsächlich	29	1
31	Box (2)	(mit Wasser gefüllt)	2	m1	e2	(wenn) dann	e3	1
32	Wasser		2	m2	e6	in	40	1
33	Richtung (2)	(zum Beobachter)	2	m3	e7	in	41	1
34	Beobachter		2	m4	e8	ist	7	1
35	Grenzfläche (2)	(von Wasser zu Luft)	3	m5	m4	für	e3	1
36	Luft		2	m6	e11	führt zu ... (und) ...	e9, e10	1
37	Brechung		3	m7	e13	in	12	1
38	Strahlen		3	m8	e14	über ... (und) ...	17, 18	1
39	$n_1 < n_2$		3	m9	m8	durch	14	1
40	Medium (1)		3	m10	21	(ist)	e15	0
41	Medium (2)		3	m11	e18	von	26	1
				m12	m11	dann	e17	1
				m13	e20	bei	28	1
				m14	e23	von	29	1
				m15	e25	zu	36	1
				m16	e28	da	e27	1
				m17	29	sieht weiter hinten aus als	e30	1
				m18	m17	durch	37	0

ao2-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für ao2-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Licht		3	e1	1	besitzt	2	1
2	Wellencharakter		3	e2	3	hängt ab von	4	1
3	Lichtgeschwindigkeit		3	e3	5	hat	4	1
4	Eigenschaften	(vom Medium)	3	e4	1	bewegt sich fort in	5	1
5	Medium	(allgemein)	3	e5	1	besitzt	6	1
6	Eigenschaft	(von Licht)	3	e6	1	legt zurück	7	1
7	Weg		3	e7	7	ist zwischen ... (und) ...	8, 9	1
8	Punkt (1)		3	e8	7	benötigt	10	0
9	Punkt (2)		3	e9	13	hat	15	1
10	geringste Zeit	geringste Zeitdauer	3	e10	12	bewegt sich durch ... (und) ...	13, 14	0
11	Fermatsche Prinzip		3	e11	13	ist verschieden von	14	1
12	Lichtstrahl		3	e12	1	hat	16	1
13	Medium (1)		3	e13	1	legt zurück	17	1
14	Medium (2)		3	e14	18	hat	15	1
15	höherer Brechungsindex		3	e15	21	hat	20	1
16	geringere Geschwindigkeit		3	e16	12	wird gebrochen hin zu	20	1
17	längere Strecke		3	e17	12	legt zurück	22	1
18	Wasser		2	e18	12	hätte gerade verbunden	23	1
19	Luft		2	m1	e1	dadurch	e2	1
20	Lot		3	m2	e8	ist	11	0
21	Grenzfläche		3	m3	e8	ist	6	0
22	geringere Strecke		3	m4	e9	als	14	1
23	Punkte		3	m5	m4	also	e12	1
				m6	e13	in	13	1
				m7	m6	um zu erreichen	10	1
				m8	e10	dann	m7	1
				m9	e14	als	19	1
				m10	e17	in	18	1
				m11	e16	dadurch	e17	1
				m12	m9	somit	e16	1
				m13	m10	als	e18	1
				m14	e12	in	13	1

ao2-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für ao2-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Licht		3	e1	1	besitzt	2	1
2	Wellencharakter		4	e2	3	hängt ab von	4	1
3	Lichtgeschwindigkeit		3	e3	5	hat	4	1
4	Eigenschaften	(vom Medium)	3	e4	1	bewegt sich fort in	5	1
5	Medium	(allgemein)	3	e5	1	besitzt	6	1
6	Eigenschaft	(von Licht)	3	e6	1	legt zurück	7	1
7	Weg		3	e7	7	ist zwischen ... (und) ...	9	1
8	Punkt (1)		3	e8	7	benötigt	10	0
9	Punkt (2)		3	e9	13	hat	15	1
10	geringste Zeit	geringste Zeitdauer	4	e10	12	bewegt sich durch ... (und) ...	13, 14	0
11	Fermatsche Prinzip		4	e11	13	ist verschieden von	14	1
12	Lichtstrahl		3	e12	1	hat	16	1
13	Medium (1)		3	e13	1	legt zurück	17	1
14	Medium (2)		3	e14	18	hat	15	1
15	höherer Brechungsindex		3	e15	21	hat	20	1
16	geringere Geschwindigkeit		3	e16	12	wird gebrochen hin zu	20	1
17	längere Strecke		3	e17	12	legt zurück	22	1
18	Wasser		2	e18	12	hätte gerade verbunden	23	1
19	Luft		2	e19	12	legen zurück	25	1
20	Lot		3	e20	27	weisen auf	28	1
21	Grenzfläche		3	e21	30	ist zwischen ... (und) ...	24, 31	1
22	geringere Strecke		3	e22	31	läge weiter hinten in	33	1
23	Punkte		3	e23	24	erhält	32	1
24	Betrachter	menschlicher Betrachter, Auge	2	m1	e1	dadurch	e2	1
25	gerader Weg		3	m2	e8	ist	11	0
26	Objekt	(allgemein)	2	m3	e8	ist	6	0
27	gebrochenen Lichtstrahlen		3	m4	e9	als	14	1
28	flacherer Austrittswinkel		3	m5	m4	also	e12	1
29	Wasseroberfläche		2	m6	e13	in	13	1
30	direkte Verbindungslinie		3	m7	m6	um zu erreichen	10	1
31	Münze	Objekt	2	m8	e10	dann	m7	0
32	Eindruck		2	m9	e14	als	19	1
33	Behälter		2	m10	e17	in	18	1
				m11	e16	dadurch	e17	1
				m12	m9	somit	e16	1
				m13	m10	als	e18	1
				m14	e19	von	26	1
				m15	m14	zum	24	1
				m16	24	geht aus von	m15	1
				m17	e20	aus	29	1
				m18	m17	als	30	1
				m19	e22	ist	32	1
				m20	e23	da	m18	0
				m21	e12	in	13	1

a03-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für a03-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Laserstrahl		2	e1	1	wird gekrümmt bei	2	1
2	Eintreten		2	e2	3	hat	4	1
3	Wasser		2	e3	6	hat	5	1
4	Stoffeigenschaft (1)	(von Wasser)	3	e4	4	ist unterschiedlich zu	5	1
5	Stoffeigenschaft (2)	(von Luft)	3	e5	3	hat	7	1
6	Luft		2	e6	3	hat	8	1
7	höhere Stoffdichte		3	e7	6	hat	9	1
8	Brechzahl (1)	(von Wasser)	3	e8	8	ist höher als	9	1
9	Brechzahl (2)	(von Luft)	3	e9	10	wird gebrochen	10	1
10	Lichtstrahl	Strahl	3	e10	10	bewegt sich zu	12	0
11	optisch dünnerer Stoff		3	e11	10	wird gebrochen hin zu	13	1
12	optisch dichter Stoff		3	e12	13	ist	14	1
13	Lot		3	e13	14	ist orthogonal zu	15	1
14	imaginäre Linie		3	e14	15	ist hier	3	1
15	Brechungsoberfläche		3	e15	2	findet statt an	16	1
16	Punkt		2	e16	14	befindet sich an	16	1
17	Brechungswinkel		3	e17	17	ist kleiner als	18	1
18	Einfallswinkel		3	e18	10	(wenn) ... geht über in	6	1
				m1	e1	in	3	1
				m2	e1	ist zu erklären durch	e4	1
				m3	e1	ist temperatur- und stoffspezifisch	e1	1
				m4	e5	als	6	1
				m5	e8	da	m4	1
				m6	e8	führt zu	e9	1
				m7	e10	von	11	0
				m8	e11	da	m7	0
				m9	e18	von	3	1
				m10	m9	dann wäre ... (andersherum)	e11	1

ao3-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für ao3-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	optischer Effekt		2	e1	3, 4	... (und) ... haben	2	1
2	Brechungseigenschaften		3	e2	1	ist zurückzuführen auf	2	1
3	Stoff 1	Luft	2	e3	1	kann hier gut beobachtet werden	1	1
4	Stoff 2	Wasser	2	e4	3	hat	6	1
5	Stoffdichte (Wasser)		4	e5	4	hat	5	1
6	Stoffdichte (Luft)		4	e6	5	ist unterschiedlich (zu)	6	1
7	Licht	es	3	e7	5, 6	... (und ...) sind temperatur- und stoffspezifisch	5, 6	1
8	Durchqueren	Durchquerung	3	e8	4	ist optisch dichter als	3	1
9	Grenzschicht		3	e9	7	wird gebrochen bei	8	1
10	optisch dünneres Material		3	e10	3, 4	... (und) ... haben	9	1
11	optisch dichteres Material		3	e11	7	bewegt sich zu	10	1
12	Lot		3	e12	7	wird weggebrochen von	12	1
13	imaginäre Linie		3	e13	12	ist	13	1
14	Oberfläche		2	e14	13	befindet sich orthogonal zu	14	1
15	Ort	(der Durchquerung)	3	e15	8	hat	15	1
16	Lichtstrahl		3	e16	17	ist größer als	18	1
17	Ausfallswinkel		3	e17	19	wirkt an	20	1
18	Einfallswinkel		3	m1	e6	definiert	2	0
19	Münze		2	m2	e9	von	9	1
20	anderer Ort	(der Münze)	2	m3	e9	da	e8	1
				m4	e11	von	11	1
				m5	m4	dadurch	e12	1
				m6	e15	(von)	16	1
				m7	e14	an	15	1
				m8	e12	somit	e16	1
				m9	m8	deshalb	e17	0

ao4-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für ao4-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Behälter		2	e1	1	ist gefüllt mit	2	1
2	durchsichtige Flüssigkeit	Flüssigkeit	2	e2	2	(ist)	3	1
3	Wasser		2	e3	4	ist zu sehen	4	1
4	Laser		2	e4	4	hat	5	1
5	Strahl		2	e5	5	ist gerichtet auf	1	1
6	Moment		2	e6	5	trifft auf	3	1
7	Richtung	(von Laser)	2	e7	5	verändert seine	7	1
8	menschliche Auge		2	e8	5	erscheint abgelenkt für	8	1
9	Grund		3	e9	10	hat	9	1
10	optische Täuschung		1	e10	9	liegt in	11	1
11	Brechung		3	e11	12	besitzen	14	1
12	unterschiedliche Medien		3	e12	12	sind hier ... und ...	3, 13	1
13	Luft		2	e13	14	(betreffen)	15	0
14	verschiedene Eigenschaften		3	e14	14	ist	17	1
15	Durchlässigkeit		4	m1	e6	in	6	1
16	Licht		3	m2	e7	in	6	1
17	Brechungsindex		3	m3	e8	ist	10	0
				m4	e13	von	16	1

ao4-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für ao4-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Box (1)	linker Behälter	2	e1	1	ist zu sehen	1	1
2	Box (2)	rechter Behälter	2	e2	2	ist zu sehen	2	1
3	Münze (1)	Objekt	2	e3	3	befindet sich in	1	1
4	Münze (2)		2	e4	3	befindet sich in	4	1
5	Wasser		2	e5	3	ist nur halb zu sehen in	1	1
6	Grund		3	e6	2	ist gefüllt mit	5	1
7	Effekt		2	e7	3	ist halb verdeckt in	1	1
8	Brechung		3	e8	4	ist komplett zu sehen in	2	1
9	Luft		2	e9	7	hat	6	1
10	Medium		3	e10	6	ist	8	1
11	Probanden		2	e11	10	ist	9	1
12	Ecke		2	e12	9	lässt halb erscheinen	3	0
13	Ganzes		2	e13	11	schaut um	12	1
				e14	11	betrachtet	4	1
				m1	e8	während	e7	1
				m2	m1	ist	7	1
				m3	5	erlaubt	e13	1
				m4	e14	als	13	1
				m5	5	erlaubt	m4	1

boi-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für boi-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	typisches Phänomen		2	e1	1	ist	3	1
2	Physik		3	e2	2	hat	1	1
3	Lichtbrechung		3	e3	4	ändert seine	6	1
4	einfallender Lichtstrahl		3	e4	4	wird gebrochen	4	1
5	Oberfläche		2	e5	8	hat	7	1
6	Richtung	(von einfallender Lichtstrahl)	3	e6	9	liefert	7	1
7	Erklärung		3	e7	12	breitet sich aus mit	11	1
8	Verhalten		3	e8	11	ist	10	1
9	Optik		3	e9	10	hängt ab von	13	1
10	Ausbreitungsgeschwindigkeit		3	e10	13	umgibt	14	1
11	Geschwindigkeit		3	e11	15	hat andere	16	1
12	Licht		3	e12	15	schreibt man zu anderen	19	1
13	Medium		3	e13	13	bricht	14	0
14	Lichtstrahlen	Strahlen	3	e14	21, 22	haben	20	1
15	Wasser		2	e15	20	liefert	23	1
16	physikalische Eigenschaften		3	e16	24	ist gleich	25	1
17	Luft		2	e17	26	ist	19	1
19	Brechungsindex	(allgemein)	3	e18	23	ist anwendbar in	27	1
20	Zusammenhang		3	e19	23	(ist) nicht (anwendbar) in	28	1
21	Einfallswinkel		3	m1	e3	an	5	1
22	Ausfallswinkel		3	m2	m1	ist zu erkennen	m1	1
23	Snelliusche Brechungsgesetz	Gesetz	3	m3	m1	ist	8	1
24	$n(\text{Luft}) \cdot \sin(\text{Einfallswinkel})$		3	m4	e11	als	17	1
25	$n(\text{Wasser}) \cdot \sin(\text{Ausfallswinkel})$		3	m5	e12	als	17	1
26	n		3	m6	19	gibt an, wie stark	e13	0
27	klassische geometrische Optik		3	m7	m5	da	e11	1
28	Nahbereich		3	m8	e6	so	e9	1
			3	m9	23	lautet	e16	1
				m10	e16	wobei	e17	1

boI-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für boI-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	klassische Brechungsphänomene		2	e1	1	zeigen sich hier	1	1
2	Stift		2	e2	2	wirkt deutlich gekrümmt für	3	1
3	menschliche Auge		2	e3	2	ist nicht gekrümmt	2	1
4	Erklärung		3	e4	5	liefern	4	1
5	Brechungsgesetze		3	e5	6, 7	... (bzw.) ... fallen ein in	3	1
6	Lichtstrahlen		3	e6	6	werden unterschiedlich abgelenkt	6	1
7	Lichtphotonen		4	e7	7	werden unterschiedlich abgelenkt	7	1
8	zusammenhängendes Bild		3	e8	6, 7	... (bzw.) ... treffen je nachdem anders auf	3	1
9	Gehirn		2	e9	8	ergibt sich in	9	1
				e10	8	stellt verzerrt dar	2	0
				m1	e2	obwohl	e3	1
				m2	e8	nun (/daher)	e9	0
				m3	e4	(für)	m1	0

bo2-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für bo2-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Brechung		3	e1	1	lässt sich zurückführen auf	6	1
2	Laserstrahl		2	e2	7	hat	6	1
3	Übergang		3	e3	2	erfährt	1	1
4	Luft		2	e4	3	(ist) in	5	1
5	Wasser		2	e5	7	breitet sich aus in	5	1
6	Ausbreitungsgeschwindigkeit	Lichtgeschwindigkeit	3	e6	7	breitet sich aus in	4	1
7	Licht		3	e7	7	erfährt	9	1
8	verschiedene Medien	Medien, jeweiliges Medium	3	e8	9	stellt man sich vor mit Hilfe von	10	1
9	Ausbreitung		3	e9	12	ist zwischen	13	1
10	Huygens'sche Elementarwellen		3	e10	14	erhält man, wenn man verbindet	15	1
11	Frequenz		3	e11	14	ändert sich bei	3	1
12	Abstand		3	e12	1	kann quantitativ beschrieben werden durch	16	1
13	Wellenberge		3	e13	1	kann abgeleitet werden aus	17	1
14	Ausbreitungsrichtung		3	e14	8	haben ... (und) ...	18, 19	1
15	einhüllende Wellenfronten		3	e15	6	geht ein in ... (und) ...	18, 19	1
16	Brechungsgesetz		3	m1	e2	in	8	1
17	geometrische Überlegungen		3	m2	e4	von	4	1
18	Brechzahl (1)		3	m3	e3	bei	m2	1
19	Brechzahl (2)		3	m4	e5	langsamer als	e6	1
				m5	e9	in	5	1
				m6	e9	in	4	1
				m7	m5	geringer als	m6	1
				m8	m7	bei gleicher	11	1
				m9	e8	dann	m8	1
				m10	e10	dann	e11	1
				m11	m10	entspricht beobachteter	1	1

bo2-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für bo2-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Phänomen		2	e1	1	lässt sich erklären durch	2	1
2	Brechung		3	e2	3	gehen aus von	4	1
3	Lichtstrahlen (1)	(von Stift in linker Box)	3	e3	4	ist in	5	1
4	Stift (links)		2	e4	3	bewegen sich zu	7	0
5	linke Box		2	e5	8	liegt nicht vor zwischen	9	1
6	direkter Weg		3	e6	11	gehen aus von	10	1
7	Beobachter		2	e7	10	ist in	12	1
8	Übergang		3	e8	11	werden gebrochen bei	8	1
9	Medien		3	e9	8	findet statt in (zu)	13	1
10	Stift (rechts)		2	e10	11	treffen	7	1
11	Lichtstrahlen (2)	(vom Stift im Wasser)	3	e11	7	nimmt wahr	11	0
12	Wasser		2	e12	14	(ist) nach	2	1
13	Luft		2	e13	7	konstruiert	15	1
14	Winkel		3	e14	11	haben	15	1
15	Ursprung		3	e15	18	(erscheint in)	10	1
16	(falsche) Position		2	e16	18	ist	17	1
17	Eindruck		2	e17	19	(erscheint) flacher als	5	1
18	Knick		2	m1	e4	auf	6	0
19	rechte Box		2	m2	m1	da	e5	0
				m3	e9	von	12	1
				m4	e11	mit	e12	0
				m5	e13	an	16	1
				m6	e17	(ist)	17	1
				m7	m5	somit	e15	1
				m8	m5	somit	e17	1
				m9	e8	anschließend	e10	1

bo3-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für bo3-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Laserstrahl	Strahl	2	e1	1	macht	8	1
2	Übergang		3	e2	3	ist	4	1
3	Luft		2	e3	6	ist	7	1
4	optisch dünneres Medium		3	e4	6	ist in	5	1
5	Behälter		2	e5	2	(findet statt in)	5	1
6	Wasser		2	e6	10	(erfährt)	9	1
7	optisch dichteres Medium		3	e7	1	bricht sich hin zu	13	1
8	Knick		2	e8	14	ist größer als	15	1
9	Brechung		3	e9	17	haben	16	1
10	Licht		3	e10	15	lässt sich berechnen mithilfe von	16	1
11	Wasseroberfläche		2	e11	1	erscheint geknickt	1	1
13	Lot		3	e12	18	untersucht	9	1
14	Einfallswinkel		3	m1	e1	bei	2	1
15	Brechwinkel	Winkel	3	m2	e5	von	3	1
16	Verhältnis		3	m3	e6	an	11	1
17	Brechungsindize		3	m4	e7	bei	2	1
18	Beobachter		2	m5	18	erkennt, dass	m4	1
				m6	e7	heißt	e8	1
				m7	m6	führt zu	e11	0
				m8	e12	dann	m5	1

bo3-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für bo3-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Bleistift	Gegenstand	2	e1	3	ist gefüllt mit	2	1
2	Wasser		2	e2	1	erscheint geknickt in	3	1
3	Behälter (1)	Gefäß	2	e3	3	hat	4	1
4	Boden		2	e4	4	erscheint näher in	3	1
5	luftgefüllter Behälter	Behälter (2)	2	e5	1	hat	6	1
6	Bild	Abbild	3	e6	6	(ist) unter	2	1
7	Brechung		3	e7	6	resultiert aus	7	1
8	Licht		3	e8	8	(erfährt)	7	1
9	Austritt		3	e9	8	fällt auf	1	1
10	Auge		2	e10	8	wird gebrochen bei	9	1
11	Übergang		3	e11	8	trifft auf	10	1
12	optisch dichtere Medium		3	e12	9	ist	11	1
13	optisch dünnere Medium		3	e13	8	wird gebrochen weg von	14	1
14	Lot		3	e14	15	ist	16	0
15	optischen Achse		3	e15	8	wird gebrochen hin zu	15	0
16	Wasseroberfläche		2	e16	6	erscheint näher	6	1
				m1	e2	als in	5	1
				m2	e4	als in	5	1
				m3	e10	aus	2	1
				m4	m3	bevor	e11	1
				m5	e12	von	12	1
				m6	m5	zu	13	1
				m7	e13	bei	11	1
				m8	e15	dadurch ... und ...	e16, e4	0

coi-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für coi-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	linke Box	2		e1	3	(ist)	4	1
2	Münze (1)	2		e2	2	befindet sich in	3	1
3	Medium (1)	3		e3	5	befindet sich in	3	1
4	Luft	2		e4	5	sieht so wie sonst	2	1
5	Beobachter	2		e5	7	befindet sich in	8	1
6	rechte Box	2		e6	8	(ist)	9	1
7	Münze (2)	2		e7	5	befindet sich in	4	1
8	Medium (2)	3		e8	11	(wird) reflektiert (von)	7	1
9	Wasser	2		e9	11	wird gebrochen an	12	1
10	Brechungsgesetz	3		e10	12	(ist) zwischen ... (und) ...	3, 8	1
11	reflektierte Licht	3		e11	7	ist (scheinbar) weiter hinten in	9	1
12	Grenze	3		m1	e2	in	1	1
13	Anschein	2		m2	e2, e3	... (und) ... deshalb	e4	1
				m3	e5	in	6	1
				m4	e5	anders als	e7	1
				m5	e9	durch	10	0
				m6	e11	als	2	1
				m7	m6	ist	13	1
				m8	13	entsteht durch	e9	0

coi-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für coi-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	linker Stift		2	e1	3	wird reflektiert von	1	1
2	rechter Stift		2	e2	3	wird reflektiert ungebrochen in (/zu)	4	1
3	reflektierte Licht (1)	(linker Stift)	3	e3	5	wird reflektiert von	2	1
4	Auge	Beobachter, menschliches Auge	2	e4	5	wird gebrochen durch	6	1
5	reflektierte Licht (2)	(rechter Stift)	3	e5	6	(ist) zwischen	7	1
6	Grenzübergang		3	e6	5	trifft auf	4	1
7	Medien		3	e7	2	hat	10	1
8	anderer Winkel		3	e8	10	erscheint geknickt	10	1
9	optische Täuschung		1	e9	10	befindet sich unter	11	1
10	Teil		2	m1	e4	während	e2	1
11	Wasser		2	m2	e6	unter	8	1
				m3	e8	ist	9	1
				m4	m2	dadurch	e8	0

co2-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für co2-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Experiment		2	e1	4	(ist in)	3	1
2	Münze	(in Wasser)	2	e2	2	befindet sich an	5	1
3	Behälter (1)	(mit Wasser, rechts)	2	e3	2	befindet sich höher gelegen	2	1
4	Wasser		2	e4	8	erfahren	7	1
5	andere Position		2	e5	6	entsteht durch	7	1
6	Eindruck		2	e6	10	nimmt wahr	9	1
7	Brechung		3	e7	10	sieht	11	1
8	Lichtstrahlen		3	e8	11	(stammen aus)	12	1
9	nicht leuchtender Gegenstand		3	e9	11	durchqueren (rechts) nur	14	0
10	Auge	man, (Beobachter)	2	e10	11	durchqueren (rechts) zunächst	4	1
11	reflektierten Lichtstrahlen	reflektierte Strahlen	3	e11	15	ist geringer in	4	1
12	Lichtquelle		3	e12	16	benötigt unterschiedlich viel	17	1
13	Behälter (2)	(mit Luft, links)	2	e13	16	sucht	20	1
14	Luft		2	e14	20	ist	22	1
15	Lichtgeschwindigkeit		3	e15	23	macht	25	1
16	Licht		3	e16	24	ist zwischen ... und ...	14, 4	1
17	Zeit		4	e17	32	interpretiert automatisch	16	1
18	beide Teilstrecken		3	e18	32	verlängert gerade	23	1
19	Fermatsche Prinzip		4	e19	2	scheint weiter hinten zu liegen	2	1
20	Weg		3	e20	27	lässt sich quantitativ analysieren mithilfe von	28	1
21	kürzeste optische Weglänge		4	e21	28	benötigt	29	0
22	Gerade		3	e22	29	ist	30	1
23	Strahl		3	e23	31	haben	29	1
24	Grenze		3	m1	e2	in	3	1
25	Knick		3	m2	e2	oder	e3	1
26	gerader Strahl		3	m3	1	lässt vermuten	m2	1
27	Phänomen		2	m4	m3	ist	6	1
28	Snelliusschen Brechungsgesetz		3	m5	e4	in	4	1
29	Brechungsindex		3	m6	e6	(wenn) dann	e7	0
30	n		3	m7	e9	in	13	0
31	Medien		3	m8	e10	und dann	14	1
32	Gehirn		2	m9	e11	als in	14	1
				m10	e12	für	18	1
				m11	e13	mit	21	1
				m12	m11	nach	19	1
				m13	e14	in	13	1
				m14	e15	an	24	1
				m15	m14	in	3	1
				m16	e17	als	26	1
				m17	m15	jedoch	m16	1
				m18	e18	sodass	e19	0
				m19	e17	und	e18	1

co2-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für co2-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Geschwindigkeit (1)	(in Wasser)	4	e1	3	hat	1	1
2	Geschwindigkeit (2)	(in Luft)	4	e2	3	hat	2	1
3	Licht		3	e3	1	ist geringer als	2	1
4	Wasser		2	e4	3	benötigt	6	1
5	Luft		2	e5	7	ist in	4	1
6	andere Zeit		4	e6	8	führt durch	5	1
7	Teilweg		3	e7	3	hat	10	1
8	Weg		3	e8	3	hat	11	1
9	Fermatsche Prinzip		4	e9	11	ist am geringsten	11	1
10	Strahlengang		3	e10	12	ist in	13	1
11	optische Weglänge		4	e11	14	ist zwischen	15	1
12	Knick	(im Strahl)	3	e12	16	interpretiert	12	1
13	Strahl		3	e13	16	verlängert gerade nach hinten	13	1
14	Grenzfläche		3	e14	19	ist senkrecht zu	14	1
15	Medien		3	e15	18	ist zwischen ... und ...	19, 13	1
16	Gehirn		2	e16	13	geht über in	21	1
17	Snelliussche Brechungsgesetz		3	e17	18	wird größer	18	1
18	Winkel		3	e18	22	ist (/findet statt) in	5	1
19	Einfallslot		3	e19	23	bezieht sich auf	24	1
20	optisch dichteres Material		3	e20	24	ist größer bei	4	1
21	optische dünneres Material		3	e21	26	hat	25	1
22	Übergang		3	e22	25	ist in	4	1
23	optische Dicke	(optische Dichte?)	3	e23	25	erscheint nach hinten verschoben	25	0
24	Brechungsindex	(allgemein)	3	e24	26	hat	28	1
25	Teil		2	m1	e1	in	4	1
26	Stift		2	m2	e2	in	5	1
27	Eindruck		2	m3	e3	dadurch	e4	1
28	Knick	(im Stift)	2	m4	e4	um zurückzulegen	7	1
				m5	m4	als für	8	1
				m6	10	wird so optimiert, dass	e9	0
				m7	m6	führt zu	12	0
				m8	e10	an	14	1
				m9	e12	indem	e13	1
				m10	e16	von	20	1
				m11	m10	dann	e17	1
				m12	m11	nach	17	1
				m13	e17	geschieht bei	22	1
				m14	e18	von	4	1
				m15	e20	als bei	5	1
				m16	m15	daher	e23	0
				m17	e24	ist	27	1
				m18	e23	dadurch entsteht	27	0
				m19	m6	nach	9	1

co3-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für co3-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Kiste (1)	linke Kiste	2	e1	1	ist zu sehen	1	1
2	Kiste (2)		2	e2	2	ist zu sehen	2	1
3	Münze (1)	Erste	2	e3	1	(hat)	5	1
4	Münze (2)	zweite Münze	2	e4	2	(hat)	6	1
5	Mittelpunkt (1)	Punkt (1)	2	e5	3	(ist) in	5	1
6	Mittelpunkt (2)	Punkt (2)	2	e6	4	(ist) in	6	1
7	Wasser		2	e7	5	(ist) derselbe (wie)	6	1
8	Phänomen		2	e8	1	(hat nicht)	7	1
9	Brechung		3	e9	1	(ist) mit / (hat)	3	1
10	Licht		3	e10	3	scheint weiter vorn zu liegen	3	1
11	Brechungsindex n	(von Wasser)	3	e11	4	(ist) in	2	1
12	Luft		2	e12	2	(hat)	7	1
13	Wahrnehmung		2	e13	4	befindet sich scheinbar weiter hinten	4	1
14	anderer Punkt		2	e14	10	(erfährt)	9	1
15	Brechungsindex (Luft)		3	e15	8	hängt zusammen mit	9	1
				e16	8	hängt zusammen mit ... (und) ...	11, 15	1
				e17	7	hat	11	1
				e18	12	hat	15	1
				e19	11	ist höher als	15	1
				e20	10	wird anders gebrochen	10	0
				e21	4	erscheint an	14	1
				m1	e10	während	e13	1
				m2	m1	ist	8	1
				m3	e20	da	e19	0
				m4	e21	als	3	1
				m5	m4	in	13	1

co3-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für co3-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	man	wir	2	e1	1	kann sehen	2	1
2	Stift (1)	(in Luft)	2	e2	1	kann sehen	3	1
3	Stift (2)	Gegenstand (in Wasser)	2	e3	2, 3	... (und) ... befinden sich an	4	1
4	selber Ort		2	e4	5	ist ohne	7	1
5	Kiste (1)	(ohne Wasser)	2	e5	6	ist gefüllt mit	7	1
6	Kiste (2)	(mit Wasser)	2	e6	3	erscheint nach oben gekrümmt	3	1
7	Wasser		2	e7	8	(ist in/ findet statt in)	7	0
8	Lichtbrechung		3	e8	2	erscheint gerade	2	1
9	Effekt		2	e9	7	hat	10	1
10	höherer Brechungsindex		3	e10	10	sorgt für	11	1
11	andere Brechung		4	e11	12	(erfährt)	11	1
12	Licht		3	e12	1	hat	13	1
13	Wahrnehmung		2	e13	3	wird krumm wahrgenommen in	13	1
				e14	9	lässt sich beobachten	9	1
				m1	e3	in	5	1
				m2	e3	in	6	1
				m3	e4	während	e5	1
				m4	e6	in	6	1
				m5	e6	wegen	8	0
				m6	e6	während	e8	1
				m7	e10	führt zu	e13	0
				m8	m7	(ist)	9	0

co4-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für co4-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Glasbecken (1)		2	e1	1	ist zu sehen mit	3	1
2	Glasbecken (2)		2	e2	2	ist zu sehen mit	4	1
3	Münze (1)		2	e3	3, 4	... (und) ... liegen genau an	5	1
4	Münze (2)	(in Wasser)	2	e4	2	ist gefüllt mit	6	1
5	selbe Stelle		2	e5	4	erscheint weiter nach hinten verschoben (für)	7	1
6	Wasser		2	e6	8	(erfolgt) in	11	1
7	Betrachter		2	e7	9	wird gebrochen in	12	1
8	Eintritt		3	e8	4	liegt eigentlich hinter	14	1
9	Licht		3	e9	4	ist in	6	1
10	dünneres Medium		3	e10	4	ist vollständig zu sehen	4	1
11	dichteres Medium		3	m1	e4	wodurch	e5	1
12	Richtung		3	m2	e6	von	10	1
13	senkrechtes Lot		3	m3	m2	für	2	1
14	undurchsichtige Wand		2	m4	e7	zum	13	1
				m5	m4	bei	8	1
				m6	m5	dadurch	e10	0

co4-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für co4-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Glasbecken (1)		2	e1	1	beinhaltet	4	1
2	Glasbecken (2)		2	e2	2	beinhaltet	5	1
3	selbe Stelle		2	e3	4, 5	... (und) ... sind an	3	1
4	Bleistift (1)	(in Wasser)	2	e4	6	(erfolgt) zum (/in)	9	1
5	Bleistift (2)	(nur in Luft)	2	e5	10	wird verursacht bei	6	1
6	Eintritt		3	e6	4	ist halb eingetaucht in	11	1
7	Licht		3	e7	4	erscheint abgeknickt	4	1
8	dünneres Medium		3	e8	13	lässt nicht so tief erscheinen	14	0
9	dichteres Medium		3	m1	e4	vom	8	1
10	Lichtbrechung		3	m2	m1	für	7	1
11	Wasser		2	m3	e7	durch	10	0
12	Lot		3	m4	m2	(ist)	13	1
13	gebrochenes Licht		3	m5	m4	hin zu	12	1
14	Bleistiftspitze		2	m6	e8	als bei	5	0

doi-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für doi-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Laserstrahl		2	e1	1	kann behandelt werden als	2	1
2	elektromagnetische Welle		3	e2	5	nimmt	6	1
3	geometrische Optik		3	e3	1	nimmt	5	1
4	Fermatsche Prinzip		3	e4	9	(wird) geteilt durch	10	1
5	Weg	(von Laserstrahl)	3	e5	1	(verläuft auf)	5	1
6	kürzeste Zeit		3	e6	5	wird normalerweise sein	11	1
7	Anspruch		3	e7	13	besitzt	12	1
8	Zeit	(allgemein)	3	e8	13	breitet sich aus in	14	1
9	Weg	(allgemein)	3	e9	12	hängt hab von	14	1
10	Geschwindigkeit	(allgemein)	3	e10	15	ist z.B.	16	1
11	Gerade		3	e11	17	ist klein in	15	1
12	Geschwindigkeit	(von Licht)	3	e12	18	ist groß in	15	1
13	Licht		3	e13	19	ist z.B.	20	1
14	optisches Medium		3	e14	21	ist groß in	19	1
15	optische dünnes Medium		3	e15	22	ist klein in	19	1
16	Luft		2	e16	23	besteht	23	1
17	Brechungsindex (1)		3	e17	1	will gelangen zu	25	1
18	Geschwindigkeit (1)		3	e18	1	ist schneller in	16	1
19	optisch dichtes Medium		3	e19	5	ist mehr zurückzulegen in	16	1
20	Wasser		2	e20	1	ist langsamer in	20	1
21	Brechungsindex (2)		3	e21	1	versucht zu minimieren seine	26	0
22	Geschwindigkeit (2)		3	m1	e1	mit	3	1
23	antiproportionaler Zusammenhang		3	m2	e2	in	7	1
24	Ausgangspunkt		3	m3	e3	nach	4	1
25	Endpunkt		3	m4	e1	somit	m3	1
26	Laufzeit		3	m5	8	ist	e4	1
				m6	m5	also	e6	1
				m7	e11	somit	e12	1
				m8	e14	somit	e15	1
				m9	e17	von	24	1
				m10	m9	dabei	e18	1
				m11	e19	als in	20	1
				m12	m11	lohnt sich für	1	1
				m13	m12	denn	e20	0
				m14	m13	also	e21	1

doi-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für doi-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Beobachter	Auge, Gehirn	2	e1	1	sieht	2	1
2	Münze		2	e2	3	wird reflektiert von	2	1
3	Licht		3	e3	3	gelangt in (/zu)	1	1
4	Strahlen		3	e4	3	kann betrachtet werden als	4	1
5	Fermatsche Prinzip		4	e5	5	gilt für	4	1
6	Regeln der Brechung		3	e6	6	gilt für	4	1
7	Lichtstrahl		3	e7	3	wird gebrochen an	9	1
8	Weg		3	e8	9	(ist zwischen ... und ...)	10, 11	1
9	Grenzfläche		3	e9	1	denkt, dass ... sich geradlinig ausbreitet	3	1
10	Wasser		2	e10	1	verlängert	12	1
11	Luft	gerader Weg	2	e11	2	wird angehoben für	1	1
12	ankommender Lichtstrahl		3	e12	1	kann (links) nicht sehen	2	1
13	Gerade		3	e13	14	ist zwischen (... und ...)	2, 1	1
14	geradliniger Weg		3	e14	14	ist (li.) versperrt durch	15	1
15	Wand		2	e15	10	hat man (li.) nicht	10	1
16	Behälter		2	e16	10	(wenn ...) wird gefüllt in	16	1
				e17	7	nimmt nicht mehr	14	1
				m1	e1	weil	e3	1
				m2	e7	auf	8	1
				m3	m2	in (/zu)	1	1
				m4	1	weiß nicht, dass	m3	1
				m5	e10	zu	13	1
				m6	m5	dadurch	e11	1
				m7	m3	aber	m4	1
				m8	e15, e14	... und ... daher	e12	1
				m9	e16	dann ... und ...	e17, e1	1

do2-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für do2-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Verlauf	Strahl	3	e1	2	hat	1	1
2	Lichtstrahl		3	e2	3	hat	2	0
3	Laser		2	e3	1	ist zu erkennen	1	0
4	Eindringen		2	e4	3	ändert seine	7	1
5	Medium		3	e5	5	(ist) in diesem Fall	6	1
6	Wasser		2	e6	8	nennst man	9	1
7	Ausbreitungsrichtung		3	e7	10	gibt es für	16	1
8	Phänomen		2	e8	11, 12, 2	sind verschiedene	10	1
9	(Licht-)Brechung		3	e9	8	kann beschrieben werden mit	10	1
10	Modell		3	e10	13	ist	14	1
11	Teilchen		3	e11	16	(hat / vollzieht)	15	1
12	Welle		3	e12	16	breitet sich aus nach	17	1
13	einfachste Methode		3	e13	16	nimmt	18	1
14	Rahmen der geometrischen Optik		3	e14	16	biegt ab	16	1
15	Ausbreitung		3	e15	16	bewegt sich mit unterschiedlichen	19	1
16	Licht		3	e16	19	kann bestimmt werden durch	21	1
17	Fermat'sches Prinzip	(in Medium 1)	3	e17	16	hat	19	1
18	zeitlich kürzester Weg		3	e18	23	ist nicht mehr	18	1
19	Geschwindigkeit (1)		3	e19	16	gelangt zu	25	1
21	Dispersionsgleichung		3	e20	16	muss abbiegen	16	1
22	Luft		2	e21	28	hat	27	1
23	gerade Strecke		3	e22	27	kann berechnet werden durch	29	1
24	Punkt A		3	e23	29	hat	30	1
25	Punkt B		3	e24	30	wird abgeleitet aus	31	1
26	kürzeste Zeit		3	e25	30	kann bewiesen werden in	32	0
27	Grad		3	m1	e4	bei	4	1
28	Biegung	Gesetz (nachträglich mit 4 kodiert)	3	m2	m1	in	5	1
29	Snellius Brechungsgesetz		3	m3	m2	ist	8	1
30	Herleitung		4	m4	e8	um zu beschreiben	8	1
31	Wellenbild		3	m5	m17	also als	2	1
32	Elektrodynamik		3	m6	m5	hierbei	m16	1
35	Medien		3	m7	e12	heißt	e13	1
				m8	e17	in	6	1
				m9	m8	anders als in	22	1
				m10	m9	daher	e18	1
				m11	m10	wie (/anders als) in	5	1
				m12	e19	von	24	1
				m13	m12	in	26	1
				m14	e24	für	16	1
				m15	e12	gilt für	15	1
				m16	e15	in verschiedenen	35	1
				m17	e10	um zu beschreiben	8	1
				m18	e20	damit	e19	1

do2-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für do2-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Münze (1)		2	e1	1, 2	... (und) ... scheinen an	5	1
2	Münze (2)		2	e2	1	scheint woanders unter	7	1
3	Behälter (1)		2	e3	8	lässt sich zurückführen auf	9	1
4	Behälter (2)		2	e4	9	(findet statt für)	10	1
5	unterschiedliche Stelle		2	e5	27	wird gebrochen	27	1
6	senkrechter Blick		2	e6	27	ist nicht von	11	1
7	anderer Winkel		2	e7	12	fällt auf	1	1
8	Phänomen		2	e8	12	wird gebrochen	12	1
9	Brechung		3	e9	14	(ist / hat)	13	1
10	Licht		3	e10	15	gilt	15	1
11	Laser		1	e11	10	ist hier nicht	27	1
12	Streu-Licht		3	e12	10	nimmt	16	1
13	Modell		3	e13	10	muss ändern	19	1
14	Lichtstrahl		3	e14	10	ist hier	12	1
15	Fermatsche Prinzip		4	e15	20	ändern sich	20	1
16	zeitlich kürzester Weg		4	e16	1	hat	22	1
17	Durchgang		3	e17	22	scheint sich geändert zu haben für	21	1
18	Grenzfläche		3	e18	9	hat	23	1
19	Richtung		3	e19	23	kann abgeleitet werden aus	24	1
20	Geschwindigkeiten		3	e20	25	ist nur	26	0
21	Betrachter		2	m1	e1	in ... (und) ...	3, 4	1
22	Lage		2	m2	e1	kann (von oben) falsifiziert werden durch	6	1
23	Grad		3	m3	e2	ist	8	1
24	Snellius Brechungsgesetz		3	m4	e12	ist	15	1
25	scheinbare Verschiebung		3	m5	e13	bei	17	1
26	geometrisches Problem		3	m6	m5	(durch)	18	1
27	Licht	(eines Lasers)	4	m7	m6	damit	e10	1
				m8	m7	weil	e15	1
				m9	m8	dadurch	e17	0
				m10	e19	anschließend	e20	0
				m11	e10	hier in	13	1

do3-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für do3-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Laser	Strahl (im Sinne von Laserstrahl)	2	e1	1	ist ersichtlich	1	1
2	Lichtstrahl		2	e2	1	hat	2	1
3	Behälter		2	e3	2	fällt auf	3	1
4	Wasser	Oberfläche	2	e4	8	hat (/vollzieht)	7	1
5	Auftreffen		2	e5	7	findet statt innerhalb (/bei)	5	1
6	Wasseroberfläche		2	e6	7	(geschichte) zu	11	1
7	Wechsel		3	e7	9	(ist)	10	1
8	Medium		3	e8	11	(ist)	4	1
9	optisch dünneres Medium	(im Sinne von Laserstrahl)	3	e9	2	geht nicht folgend weiter dem	12	1
10	Luft		2	e10	2	erscheint abgeknickt	2	1
11	optisch dichteres Medium		3	e11	15	werden betrachtet zur	13	1
12	Einfallsstrahl		2	e12	15	treffen auf bei	14	1
13	Erklärung		3	e13	15	teilt sich teilt sich auf in ... und ...	16, 17	1
14	Übertritt		3	e14	16, 17	... (und) ... unterscheiden sich in	18	1
15	auf tretende Lichtstrahl		3	e15	19	steht senkrecht auf	6	1
16	reflektierter Anteil		3	e16	18, 19	... (und) ... sind	21	1
17	gebrochener Anteil		3	e17	21	haben	20	1
18	Winkel		3	e18	20	wird beschrieben über	22	1
19	gedachtes Lot	einfallender Lichtstrahl, Strahl	3	e19	23	ist gleich	24	1
20	Zusammenhang		3	e20	15	hat	25	1
21	Größen		3	e21	25	wird nicht reflektiert bei	14	1
22	Sn. Brechungsgesetz		3	e22	25	wird nicht gebrochen bei	14	1
23	$n_1 \cdot \sin(\alpha_1)$		3	e23	25	wird aufgeteilt (auf) ... (und) ...	16, 17	1
24	$n_2 \cdot \sin(\alpha_2)$		3	e24	17	ist visuell ersichtlich in	4	1
25	gesamter Teil		3	e25	16	ist nicht visuell ersichtlich in	4	1
				m1	e3	mit	4	1
				m2	e5	des	2	1
				m3	m2	auf	6	1
			m4	e6	von	9	1	
			m5	e9	in	4	1	
			m6	m5	sondern	e10	1	
			m7	m6	ist zu erkennen	m6	1	
			m8	e12	des	14	1	
			m9	e14	zu	19	1	
			m10	e21	und	e22	1	
			m11	e23	folgend	22	0	
			m12	22	ist	e19	1	

do3-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für do3-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Behälter (1)	(mit Wasser)	2	e1	3	ist ausgerichtet zentral auf	5	1
2	Behälter (2)		2	e2	4	ist ausgerichtet zentral auf	6	1
3	Münze (1)	Gegenstand (in Wasser)	2	e3	1	ist gefüllt mit	7	1
4	Münze (2)		2	e4	2	ist nicht gefüllt mit	7	1
5	Boden (1)		2	e5	3	ist unter	7	1
6	Boden (2)		2	e6	3	wirkt deutlich verschoben von	4	1
7	Wasser		2	e7	13	hat (/vollzieht)	12	1
8	gerade, schräge Betrachtung		2	e8	12	hat	11	1
9	Position		2	e9	11	betrachtet man zur	10	1
10	Erklärung		3	e10	36	hat (/vollzieht)	14	1
11	Wirkung		3	e11	17	erfährt keine	18	1
12	Wechsel	Medienwechsel	3	e12	13	hat (/vollzieht)	18	1
13	Medium		3	e13	20	hat	19	1
14	Übertritt		3	e14	19	gelangt ins	16	1
15	Gegenstand	(allgemein)	3	e15	16	nimmt normal wahr	4	1
16	Beobachter	Auge	2	e16	21	erfährt zunächst	22	1
17	Lichtstrahl (2)	(von Münze (2))	2	e17	21	(unterliegt)	25	1
18	Änderung		3	e18	29	(unterliegt)	28	1
19	reflektierter Anteil (2)		3	e19	16	befindet sich in	30	1
20	Licht		3	e20	28	erfolgt um zu sehen	3	1
21	Lichtstrahl (1)	(von Münze (1))	3	e21	25	(geschieht) in ... und ...	26, 27	1
22	Wechsel	(dünn-dicht)	3	e22	25	hat	31	1
23	optisch dünneres Medium		3	e23	33	hat	32	1
24	optisch dichteres Medium		3	e24	31, 32	... und ... führt zu	34	0
25	Aufspaltung	Aufteilung	4	e25	15	(erfährt)	34	1
26	reflektierter Anteil (1)		4	m1	e1	innerhalb von	1	1
27	gebrochener Anteil		3	m2	e2	innerhalb von	2	1
28	erneuter Übertritt		3	m3	e3	und	e4	1
29	jetzt vorhanden Lichtstrahl		3	m4	e2	jedoch	m3	1
30	Luft		3	m5	e6	in	9	1
31	erneute Auftretung		4	m6	m5	bei	8	1
32	Nutzung		3	m7	m6	von ... (und) ...	1, 2	1
33	Brechungsgesetz		3	m8	e8	auf	15	1
34	scheinbare Verschiebung		2	m9	e9	bei	14	1
35	eigentliche Position		2	m10	m9	hin zu	16	1
36	einfallendes Licht		3	m11	e11	ohne	7	1
				m12	e16	von	23	1
				m13	e16	zu	24	1
				m15	e18	von	7	1
				m16	m15	in	30	1
				m17	e20	mittels	16	1
				m18	e25	weg von	35	1
				m19	e16	innerhalb	12	1

do4-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für do4-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Laserstrahl	Laser	2	e1	1	geht durch	2	1
2	Luft		2	e2	2	(hat)	3	1
3	Brechungsindex (1)	(von Luft)	3	e3	3	(ist)	4	1
4	n1		3	e4	5	hat	6	1
5	Wasser		2	e5	6	ist	7	1
6	Brechungsindex (2)	(von Wasser)	3	e6	1	sieht aus, als würde abknicken	1	1
7	n2		3	e7	8	ist zwischen	9	1
8	Grenzfläche		3	e8	1	wird gebrochen an	8	1
9	Medien		3	e9	1	geht durch	5	1
10	gleicher Winkel		2	e10	3	ist unterschiedlich zu	6	1
11	Winkel		2	e11	12	hängt ab von	13	1
12	Brechungsindex	(allgemein)	3	e12	13	sind	14, 15, 16, 17, 18	1
13	verschiedene Dinge		3	e13	19	(wenn ...) trifft auf	22	1
14	Temperatur		4	e14	22	(hat)	23	1
15	Luftfeuchte		4	e15	20	hat	21	1
16	Zusammensetzung		4	e16	24	wird gebrochen hin zu	25	1
17	Dichte		3	e17	26	ist	28	1
18	Wellenlänge		3	e18	27	hat	26	1
19	Licht		3	e19	29	ist	31	1
20	optisch dünnes Medium		3	e20	30	hat	29	1
21	kleinerer Brechungsindex		3	e21	26	ist kleiner als	29	1
22	optisch dickeres Medium		3	e22	4	wäre größer als	7	1
23	größerer Brechungsindex		3	e23	24	würde weggebrochen von	25	1
24	Strahl		3	m1	e1	in	5	1
25	Lot	gedachtes Lot	3	m2	e9	in	10	1
26	Winkel (1)	(des gebrochenen Strahls)	3	m3	32	erwartet	m2	1
27	gebrochener Strahl		3	m4	11	verändert sich wegen	e10	1
28	beta		3	m5	m3	aber	m4	1
29	Winkel (2)	(des einfallenden Strahls)	3	m6	e13	von	20	1
30	einfallender Strahl		3	m7	m6	so	e16	1
31	alpha		3	m8	e22	so	e23	1
32	man	(fiktiver Betrachter)	2					

do4-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für do4-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Münze		2	e1	1	liegt in	2	1
2	Wasser		2	e2	1	erscheint optisch gehoben	1	1
3	Licht		3	e3	4	ist	5	1
4	optisch dünneres Medium		3	e4	6	ist	2	1
5	Luft		2	e5	3	geht in	6	1
6	optisch dichteres Medium		3	e6	3	wird gebrochen zu	7	1
7	gedachtes Lot		3	e7	9	ist	11	1
8	Grenzfläche		3	e8	9	(ist an)	10	1
9	Winkel (1)		3	e9	12	ist	14	1
10	gebrochener Strahl		3	e10	13	hat	12	1
11	beta		3	e11	11	ist kleiner als	14	1
12	Winkel (2)		3	e12	16	ist (scheinbar)	17	0
13	einfallender Strahl		3	e13	15	schaut auf	1	1
14	alpha		3	m1	e5	von	4	1
15	Betrachter	man	2	m2	e6	an	8	1
16	Gegenteil		3	m3	15	erwartet	e6	1
17	Fall		2	m4	m3	wenn	m1	1
18	Winkel (3)		2	m5	m4	d.h.	e11	1
				m6	e12	für	15	0
				m7	e13	in	18	1
				m8	m6	liegt an	m7	0
				m9	e12	von	e11	0

eor-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für eor-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Licht		3	e1	1	kann approximiert werden als	3	1
2	erster Näherung		3	e2	5, 6	... (und) ... (haben)	4	1
3	Strahl	Lichtstrahl	3	e3	5	hat	7	1
4	Grenzfläche		3	e4	6	hat	8	1
5	Medium (1)		3	e5	7	(ist) unterschiedlich (zu)	8	1
6	Medium (2)		3	e6	5	ist z.B.	9	1
7	Dielektrizitätskonstante (1)		3	e7	6	ist z.B.	10	1
8	Dielektrizitätskonstante (2)		3	e8	3	wird gebrochen an	4	1
9	Wasser		2	e9	12	haben	11	1
10	Luft		2	e10	11	sind	13	1
11	Stetigkeitsbedingungen		3	e11	1	wird gebrochen hin zu	18	1
12	Elektromagnetischer Felder		3	e12	15	(führt) zu	17	1
13	direkte Folgerungen		3	e13	20	hat	19	0
14	Maxwellgleichungen		3	e14	19	ist geringer nach	21	1
15	Übergang	(allgemein)	3	e15	22	erscheint nach unten geknickt bei	23	1
16	optisch dünneres Medium		3	e16	23	(führt) nach	9	1
17	optisch dichteres Medium		3	m1	e1	in	2	1
18	Lot		3	m2	e8	aufgrund	11	1
19	Winkel		3	m3	e10	aus	14	1
20	Flächennormale		3	m4	e12	von	16	1
21	Brechung		3	m5	e11	bei	15	1
22	Laserstrahl		2	m6	m5	also	e14	1
23	Übergang	(konkret)	3	m7	e16	von	10	1
				m8	e11	daher	e15	1

eoi-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für eoi-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Bleistift		2	e1	2	wird reflektiert von	1	1
2	reflektiertes Licht		3	e2	2	wird gebrochen zu	5	1
3	Übergang		3	e3	4	hat höhere	6	1
4	optisch dichteres Medium	Medium	3	e4	8	hat	7	1
5	optisch dünneres Medium	dünneres Medium	3	e5	7	wird verändert	7	1
6	Dielektrizitätskonstante		4	e6	8	wird weggebrochen von	9	1
7	Richtung		3	e7	1	hat	10	1
8	Lichtstrahl		3	e8	10	erscheint weiter oben	10	1
9	Lot		3	e9	10	ist zu erwarten in	11	1
10	Punkt		3	e10	1	erscheint nach oben geknickt	1	1
11	Gerade		3	e11	13	findet statt aufgrund	14	1
12	Betrachter		2	e12	16	ist	15	1
13	Brechung		3	e13	14	(gelten) an	18	1
14	Stetigkeitsbedingungen		4	e14	14	sind direkte	19	1
15	elektromagnetische Felder		4	e15	20	beschreiben	21	1
16	Licht	(Licht allg.)	3	e16	15	haben	21	1
17	klassische Physik		3	m1	e2	von	4	1
18	Grenzfläche		3	m2	e2	bei	3	1
19	Folgerung		4	m3	e2	heißt	e5	1
20	Maxwellgleichungen		4	m4	e6	von	5	0
21	Eigenschaften		4	m5	e6	zu	4	0
				m6	e6	daher	e8	1
				m7	e9	zu	12	1
				m8	e8	als	e9	1
				m9	m8	daher	e10	1
				m10	e11	für	15	1
				m11	e12	in	17	1
				m12	e14	aus	20	1
				m13	e15	in	17	1

eo2-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für eo2-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Beobachter		2	e1	1	sieht	2	1
2	Laserstrahl		2	e2	2	knickt ab bei	3	1
3	Übergang		3	e3	3	(führt) nach	5	1
4	Luft		2	e4	6	nennt man	7	1
5	Wasser		2	e5	1	nimmt wahr	26	1
6	Phänomen		2	e6	26	ist	9	1
7	Brechung		3	e7	9	breiten sich aus mit	11	1
8	Wirklichkeit		2	e8	9	sind (von)	12	1
9	Lichtwellen		3	e9	9	besitzen ... und ...	13, 14	1
10	Welle		3	e10	9	besitzen außerdem ... (und) ...	15, 16	1
11	bestimmte Geschwindigkeit		3	e11	13	hat ... (und) ...	15, 16	1
12	elektromagnetischer Natur		3	e12	15	(ist) senkrecht zu	17	1
13	elektrisches Feld		3	e13	16	(ist) waagrecht zu	17	1
14	Magnetfeld		3	e14	19	haben (/ unterliegen)	18	1
15	Komponente (1)	(senkrecht)	3	e15	21	wird ungehindert durchgelassen an	20	1
16	Komponente (2)	(waagrecht)	3	e16	15, 16	... (und) ... sind ... (oder) ...	21, 22	1
17	Wasseroberfläche		2	e17	22	wird nicht ungehindert durchgelassen an	20	1
18	Naturgesetze		3	e18	23	ist in	5	1
19	Felder		3	e19	23	hat	24	1
20	Grenzfläche		3	e20	2	verläuft in	25	1
21	Komponente (3)		3	m1	e3	von	4	1
22	Komponente (4)		3	m2	e2	ist	6	1
23	resultierendes Feld		3	m3	e5	als	2	1
24	andere Richtung (1)	(Feld)	3	m4	e6	in	8	0
25	andere Richtung (2)	(Laser)	2	m5	e7	wie jede	10	1
26	(fiktives Objekt)		3	m6	e14	an	20	1
				m7	e15	durch	18	1
				m8	e17	durch	18	1
				m9	e19	weshalb	e20	1

eo2-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für eo2-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Stift		2	e1	1	ist zu sehen	1	1
2	Luft		2	e2	1	ist halb in ... (und) ...	2, 3	1
3	Wasser		2	e3	1	ist vermeintlich abgelenkt	1	1
4	Knick		2	e4	17	ist nur in	2	1
5	Beobachter		2	e5	17	besitzt keinen	4	1
6	Lichtwellen		3	e6	5	nimmt wahr	6	1
7	Medium 1		3	e7	6	werden reflektiert von	1	1
8	Medium 2		3	e8	6	besitzen ... (und) ...	9, 10	1
9	Brechungsindex (1)		3	e10	7	(ist) hier	2	1
10	Brechungsindex (2)		3	e11	8	(ist) hier	3	1
11	Geschwindigkeit (1)		4	e12	9	(ist) anders (als)	10	1
12	Geschwindigkeit (2)		4	e13	13	hat	11	1
13	Licht		3	e14	13	hat	12	1
14	Linse		4	e15	11	(ist) unterschiedlich (zu)	12	1
15	Brechungsindex (3)	(der Linse)	4	e16	9	resultiert aus	11	1
16	Bild		4	e17	10	resultiert aus	12	1
17	Stift	(nur in Luft)	2	e18	14	besitzt ebenfalls	15	1
				e19	16	ist verzerrt	16	1
				m1	e8	in ... (und) ...	7, 8	1
				m2	e13	in	7	1
				m3	e14	in	8	1
				m4	14	ist ähnlich zu	e12	1
				m5	e19	stellt sich heraus als	4	0
				m6	m5	in	3	0
				m7	e15	dadurch	m5	0
				m8	e3	wohingegen	e5	1

eo4-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für eo4-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Laser	Laserstrahl	2	e1	1	geht durch ... (und) ...	2, 3	1
2	Medium (1)		3	e2	2, 3	... (und) ... sind ... und ...	4, 5	1
3	Medium (2)		3	e3	1	sieht aus, als würde abknicken an	6	1
4	Luft		2	e4	5	hat	8	1
5	Wasser		2	e5	4	hat	7	1
6	Oberfläche		2	e6	7	ist verschieden zu	8	1
7	Brechungsindex (1)		3	e7	7	ist	9	1
8	Brechungsindex (2)		3	e8	8	ist	10	1
9	N1		3	e9	7	ist größer als	8	0
10	N2		3	e10	1	wird gebrochen hin zu	11	1
11	Lot		3	e11	12	ist	13	1
12	Einfallswinkel		3	e12	14	ist	15	1
13	Alpha		3	e13	12	ist größer als	14	1
14	Brechungswinkel		3	m1	e3	liegt an	e6	1
15	Beta		3	m2	e10	da	e9	0
				m3	e10	demnach	e13	1

eo4-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für eo4-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Stift		2	e1	1	sieht so aus, als würde abknicken nach	2	1
2	Eintauchen		2	e2	3	hat	5	1
3	Wasser		2	e3	7	hat	6	1
4	optische Täuschung	Täuschung	1	e4	5	ist unterschiedlich zu	6	1
5	Brechungsindex (1)		3	e5	8	wird gebrochen an	9	1
6	Brechungsindex (2)		3	m1	e1	ins	3	1
7	Luft		2	m2	m1	ist	4	0
8	Licht		3	m3	4	ist zurückzuführen auf	e4	0
9	Wasseroberfläche		2	m4	e5	ruft hervor	4	0
10	Betrachter	Kopf	2	m5	m4	in (/für)	10	0

for-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für for-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Licht		3	e1	1	breitet sich unterschiedlich aus in	2	1
2	versch. Medien		3	e2	3	gilt zu betrachten	3	1
3	optischer Weg	Weg	3	e3	3	ergibt sich aus	4	1
4	Produkt		3	e4	5 / 6	(...) und (...) haben	4	1
5	Brechungsindex	(allg.)	3	e5	1	sucht sich immer	7	1
6	zurückgelegter Weg		3	e6	9	wird betrachtet	9	1
7	kürzester optischer Weg		4	e7	9	erscheint geknickt	9	1
8	Beobachter	menschl. Auge	2	e8	9	bleibt länger in	10	1
9	(spezieller) Lichtstrahl		3	e9	12	liegt in	13	1
10	Medium		3	e10	12	scheint verschoben zu liegen in	14	1
11	kleinerer Brechungsindex	(von Luft)	3	e11	13	hat	16	1
12	Münze		2	e12	1	wählt	3	1
13	Wasser		2	e13	3	steht möglichst senkrecht zu	18	0
14	Vergleich		2	e14	12	ist zu erreichen	12	1
15	leeres Becken		3	e15	8	rekonstruiert	19	1
16	höherer Brechungsindex	(von Wasser)	3	e16	9	hätte	20	1
17	Luft		2	e17	9	fällt komplett gebrochen auf	12	0
18	Wasseroberfläche		2	e18	12	erscheint leicht verschoben	12	1
19	Bild		3	m1	e1	dabei	e2	1
20	Verlauf		3	m2	e6	dabei	e5	1
				m3	e7	wenn	e6	1
				m4	e5	dadurch	m3	1
				m5	e8	mit	11	1
				m6	m4	da	m5	1
				m7	e10	zu	15	1
				m8	e9	so	m7	1
				m9	e11	als	17	1
				m10	m9	daher	e12	1
				m11	m10	um	e14	0
				m12	e15	aus	20	1
				m13	e16	wenn	e17	0
				m14	m11	aber	e15	1
				m15	e15	daher	e18	1

fo1-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für fo1-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Stift		2	e1	1	ist in	2	1
2	Wasser		2	e2	3	wird gebrochen bei	4	1
3	Licht		3	e3	1	hat	6	1
4	Eintreten		3	e4	5	konstruiert	6	1
5	Beobachter	Auge	2	e5	8	hat	7	1
6	Lage		2	e6	1	hat	9	1
7	Verlauf		3	e7	9	sind in	2	1
8	gebrochener Lichtstrahl		3	e8	5	sieht leicht verschoben	9	1
9	Teile	(des Stiftes im Wasser)	2	e9	5	bemerkt	11	1
11	Erscheinung		2	e10	1	erscheint geknickt	1	1
12	Wasseroberfläche		2	m1	e2	ins	2	1
				m2	e4	aus	7	1
				m3	e8	ist	11	1
				m4	e9	am besten an	12	1

fo2-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für fo2-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Box (1)	(mit Wasser)	2	e1	1	ist zu sehen	1	1
2	Box (2)		2	e2	2	ist zu sehen	2	1
3	Münze (1)	(in Wasser)	2	e3	1	ist bestückt mit	3	1
4	Münze (2)		2	e4	2	ist bestückt mit	4	1
5	Wasser		2	e5	1	enthält jedoch	5	1
6	Blickwinkel		2	e6	3	erscheint höher zu liegen in	5	1
7	gleiche Stelle		2	e7	4	ist in	2	1
8	Phänomen		2	e8	3, 4	... (und) ... liegen an exakt	7	1
9	Lichtbrechung		3	e9	8	ist zu erklären mit	9	0
10	Lichtwellen		4	e10	10	werden gebrochen in	11	1
11	bestimmter Winkel		3	e11	3	(sieht aus, als würde) höher liegen	3	1
12	Wasseroberfläche		2	m1	e6	aus	6	1
13	Eindruck		2	m2	m1	als	4	1
				m3	m2	obwohl	e8	1
				m4	m3	ist	8	1
				m5	e9	in	5	0
				m6	e10	an	12	1
				m7	e11	ist	13	1
				m8	m6	erweckt	13	1

fo2-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für fo2-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Box (1)		2	e1	1	ist zu sehen	1	1
2	Box (2)		2	e2	2	ist zu sehen	2	1
3	Bleistift (1)		2	e3	1	enthält	3	1
4	Bleistift (2)		2	e4	2	enthält	4	1
5	Wasser		2	e5	1	wurde gefüllt mit	5	1
6	optische Täuschung		1	e6	2	wurde nicht gefüllt mit	5	1
7	Lichtbrechung		3	e7	6	tritt ein	6	0
8	Lichtwellen		4	e8	3	sieht geknickt aus in	5	1
9	Wasseroberfläche		2	e9	8	treffen auf	9	1
10	bestimmter Winkel		3	e10	8	werden gebrochen an	9	1
				m1	e8	bei	6	1
				m2	m1	ist zu erklären durch	7	0
				m3	e10	in	10	1

gor-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für gor-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Brechungsindex (1)		3	e1	1	ist	3	1
2	Brechungsindex (2)		3	e2	2	ist	4	1
3	nLuft		3	e3	1	ist (unterschiedlich zu)	2	1
4	nWasser		3	e4	7	erfährt	9	1
5	Luft		2	e5	8	ist zwischen ... (und) ...	5, 6	1
6	Wasser		2	e6	4	ist größer als	3	1
7	Lichtstrahl		3	e7	14	ist gleich	15	1
8	Grenzfläche		3	e8	12	benötigt mehr	16	1
9	Brechung		3	e9	7	legt zurück	22	0
10	Snelliussche Brechungsgesetz		3	e10	20	(ist) in	5	1
11	Ausbreitung		3	e11	21	(ist) in	6	1
12	Licht		3	e12	23	lässt sich lösen als	24	1
13	niedrigere Geschwindigkeit		3	e13	22	findet man unter (/als)	9	1
14	s		3	e14	12	(hat / unterliegt)	11	1
15	v*t		3	e15	7	ist auf	19	1
16	Zeit		3	m1	e1	in	5	1
17	gleicher Weg		3	m2	e2	in	6	1
18	Fermatsche Prinzip		3	m3	e4	gemäß	10	1
19	Weg		3	m4	m3	an	8	1
20	A		3	m5	m4	wegen	e3	1
21	B		3	m7	e14	in	5	1
22	kürzester Weg		3	m8	m7	mit	13	1
23	Problem		3	m9	m8	wegen	e3	1
24	Extremalaufgabe		3	m10	e8	in	6	1
25	unterschiedliche Geschwindigkeiten		3	m11	m10	um zurückzulegen	17	1
26	Medien		3	m12	m11	als in	5	1
				m13	e15	von	20	1
				m14	m13	nach	21	1
				m15	18	besagt	m20	0
				m16	e12	mit	25	1
				m17	m16	in	26	1
				m18	18	daraus	e12	1
				m19	e8	wegen	e7	1
				m20	e9	auf	19	0

go1-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für go1-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN			
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T A
1	unterschiedliche Brechungsindizes		3	e1	3	erfolgt aufgrund	1 1
2	Grenzschicht		3	e2	4	(erfährt)	3 1
3	Richtungsänderung		3	e3	4	wird nach unten gekrümmt bei	5 1
4	Lichtstrahl		3	e4	7	erscheint nach vorn verschoben	7 1
5	Austritt		3	m1	e1	an	2 1
6	Wasser		2	m2	e3	aus	6 1
7	Bild		3	m3	m2	und	e4 1

go2-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für go2-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN			
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T A
1	Brechung		3	e1	1	ist zu sehen von	2 1
2	Laserstrahl	Strahl	2	e2	2	wird gebrochen	2 1
3	Luft		2	e3	2	wird reflektiert zum	5 1
4	Wasser		2	e4	3	hat	6 1
5	Teil		3	e5	4	hat	7 1
6	Brechungszahl (1)		3	e6	6	unterscheidet sich von	7 1
7	Brechungszahl (2)		3	e7	9	kann man einfügen an	8 1
8	Brechungspunkt		3	e8	6	kann man besser vergleichen mit	7 1
9	Lot	gedachtes Lot	3	e9	11	ist über	10 1
10	Wasseroberfläche		2	e10	12	ist unterhalb von	10 1
11	Einfallswinkel		3	e11	11	ist größer als	12 1
12	Brechungswinkel		3	e12	2	wird gebrochen zu	9 1
				e13	6	ist kleiner als	7 1
				m1	e1	von	3 1
				m2	m1	in	4 1
				m3	e2	und	e3 1
				m4	m3	weil	e6 1
				m5	e7	senkrecht zu	10 1
				m6	m5	somit	e8 1
				m7	e11	somit	e12 1
				m8	e12	bedeutet	e13 1

go2-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für go2-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Gefäß (1)		2	e1	3	ist in	1	1
2	Gefäß (2)		2	e2	4	ist in	2	1
3	Münze (1)		2	e3	1, 2	... (und) ... sind abgebildet	1, 2	1
4	Münze (2)		2	e4	3	ist gleich positioniert wie	4	1
5	Wasser		2	e5	1	wurde zusätzlich gefüllt mit	5	1
6	Mitte		2	e6	3	scheint zu liegen in	6	1
7	Grund		3	e7	1	hat	6	1
8	Licht		3	e8	3	(ist) in	5	1
9	Fall		3	e9	8	wird gebrochen in	1	1
10	Übergang		3	e10	8	wird nur gebrochen bei	10	1
11	zwei Medien		3	e11	11	haben	12	1
12	unterschiedliche Brechungszahlen		3	m1	e4	wobei	e5	1
				m2	e6	trifft aber nicht zu	e6	1
				m3	e9	ist nicht	9	1
				m4	m3	in	2	1
				m5	m2	(hat)	7	1
				m6	7	ist	m4	0
				m7	e10	von	11	1
				m8	m4	weil	m7	1

hoi-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für hoi-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Phänomen		2	e1	1	ist zu sehen	1	1
2	Effekt		2	e2	1	ist	2	1
3	optische Eigenschaften		3	e3	3	haben	2	1
4	Material (1)		2	e4	4, 5	... (und) ... haben	3	1
5	Material (2)		2	e5	4	ist	6	1
6	Wasser		2	e6	5	ist	7	1
7	Luft		2	e7	8	kommt zunächst aus	9	1
8	Laserstrahl		2	e8	8	bewegt sich durch	7	1
9	Laser		2	e9	8	trifft auf	10	1
10	Wasseroberfläche		2	e10	8	bewegt sich durch	6	1
11	Lichtgeschwindigkeit		3	e11	11	ist unterschiedlich in ... (und) ...	4, 5	1
12	Phasenfronten		3	e12	11	ist kleiner in	6	1
13	elektromagnetische Welle		3	e13	13	hat	12	1
14	Licht		3	e14	12	bewegen sich senkrecht zur	15	0
15	Ausbreitungsrichtung	(d. Lasers in Luft)	2	e15	14	hat	12	1
16	kleinere Geschwindigkeit		3	e16	12	treffen auf	10	1
17	andere Ausbreitungsrichtung	(d. Lasers im Wasser)	2	e17	12	breiten sich aus mit	16	1
18	Huygensche Prinzip		3	e18	8	breitet sich aus mit anderer	17	1
19	Ausbreitung		3	e19	8	wird gekrümmt	8	1
				e20	13	(erfahren)	19	1
				e21	18	(bezeichnet)	19	1
				e22	18	führt zu	1	1
				m1	e9	und	e10	1
				m2	e11	ist entscheidend bei	1	1
				m3	e12	als in	7	1
				m4	e14	in	7	0
				m5	e13	also	e15	1
				m6	m4	dann	e16	0
				m7	m6	und	e17	0
				m8	e18	in	6	1
				m9	e18	und	e19	1
				m10	e14	resultiert aus	e12	1

hor-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für hor-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Beobachter	Mensch, Auge, Gehirn	2	e1	1	betrachtet	2	1
2	Stift (1)	(Stift im Wasser)	2	e2	2	ist in	3	1
3	Wasser		2	e3	2	hat	4	1
4	Krümmung		2	e4	4	lässt sich feststellen	4	1
5	Stift (2)	(Stift nicht im Wasser)	2	e5	5	liegt nicht in	3	1
6	optischer Effekt		2	e6	4	ist relativ zu	5	1
7	Brechung		3	e7	4	(entspricht)	7	0
8	Laserstrahl		2	e8	8	hat	4	1
9	Lichtstrahlen	Lichtstrahl	3	e9	4	ist wie bei	6	1
10	einfallendes Licht	(ins Auge einfallendes Licht)	3	e10	9	sind als geradlinig anzusehen	9	1
11	gerade Lichtbahn		3	e11	10	fällt ein in (/ zu)	1	1
12	Knick		3	e12	1	ordnet	11	1
13	Wasseroberfläche		2	e13	9	macht	12	1
14	Bild		3	e14	9	verläuft nicht mehr geradlinig	9	1
15	gebrochene Lichtstrahlen		3	e15	1	konstruiert	14	1
16	Wahrnehmung		2	e16	9	verlaufen geradlinig	9	1
17	Punkt		2	e17	1	hat	16	1
18	Einfluss		3	e18	2	wirkt geknickt in	16	1
				e19	6	hat	18	1
				e20	9	kommen von	2	1
				e21	13	ist	17	1
				e22	9	sind unter	18	1
				e23	1	nimmt wahr	14	1
				m1	e1	so	e4	1
				m2	e4	kann zurückgeführt werden auf	6	1
				m3	1	ist programmiert auf	e10	1
				m4	e12	zu	10	1
				m5	m3	d.h.	m4	1
				m6	e13	an	13	1
				m7	m4	bezogen auf	2	1
				m8	m4	aber	m6	1
				m9	m6	und daher	e15	1
				m10	1	denkt	e16	1
				m11	m10	daher	e15	1
				m12	e15	gerade so, dass	e16	1
				m13	m6	hingegen	m10	1
				m14	e18	ab	13	1
				m15	e22	also ab	17	1

ho2-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für ho2-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Lichtstrahl	Strahl	3	e1	1	ist hier	2	1
2	Laserstrahl		2	e2	1	dringt ein in	4	1
3	Medium (1)		3	e3	5	ist hier zu sehen	5	1
4	Medium (2)	, anderes Medium,	3	e4	6	hat	7	1
5	Übergang	Durchgang	3	e5	7	ist 1	7	1
6	Luft		2	e6	8	hat	9	1
7	Brechungsindex (1)	(von Luft)	3	e7	9	ist 1,33	1	1
8	Wasser		2	e8	5	erfolgt in	11	0
9	Brechungsindex (2)	(von Wasser)	3	e9	1	wird gebrochen hin zu	12	1
10	dichteres Medium	n1	3	e10	13	wird bestimmt mit	14	1
11	dünneres Medium	n2, Eintrittsmedium	3	e11	15	mal	7	1
12	Lot		3	e12	16	mal	9	1
13	Winkeländerung		3	e13	1	wird weg gebrochen von	12	1
14	Gleichung		3	e14	18	kann (auftreten)	18	1
15	Sinus (Einfallswinkel)		3	e15	1	ist nicht mehr zu sehen in	10	1
16	Sinus (Brechungswinkel)		3	e16	1	wird gebrochen	1	1
17	große Einfallswinkel		3	m1	e2	von	3	1
18	Totalreflexion		3	m2	e3	von	2	1
				m3	e3	aus	6	1
				m4	m3	in	8	1
				m5	e8	von	10	0
				m6	m4	also	m5	1
				m7	e9	in	8	1
				m8	e9	ist	13	1
				m9	e11	ist gleich	e12	1
				m10	14	ist	m9	1
				m11	e13	bei	5	1
				m12	e13	von	10	1
				m13	e13	zu	11	1
				m14	e14	bei	17	1
				m15	m14	heißt	e15	1

ho2-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für ho2-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Bleistift (1)	(rechts)	2	e1	1	scheint gebogen	1	1
2	Beobachter	Kopf, Auge	2	e2	3	täuscht	2	0
3	reine Physik		4	e3	4	gehen aus von	1	1
4	Lichtstrahlen	(von Stift 1)	3	e4	4	treffen	2	1
5	Bild		3	e5	4	erzeugen	5	1
6	Wasser		2	e6	4	kommen aus	6	1
7	Luft		2	e7	6, 7	... (und) ... sind	8	1
8	unterschiedliche Stoffe		2	e8	8	haben	9	1
9	unterschiedliche Brechungsindizes		3	e9	4	werden abgelenkt bei	10	1
10	Übergang	(allgemein)	3	e10	10	ist zwischen ... ins (/und) ...	11, 12	1
11	Medium (1)		3	e11	10	ist hier	13	1
12	Medium (2)		3	e12	13	(erfolgt) von	14	1
13	Übergang	(speziell)	3	e13	4	werden abgelenkt nach (/bei)	13	1
14	dichtes Medium		3	e14	4	werden weggebrochen von	16	1
15	dünneres Medium		3	e15	1	scheint sich zu biegen hin zu	17	1
16	Lot		3	e16	2	(Konj.) befindet sich in	6	1
17	Wasseroberfläche		2	e17	2	(Konj.) hat	18	1
18	Bleistift (2)	(in der Hand)	1	e18	18	(Konj.) hat	20	1
19	Hand		1	e19	20	(Konj.) sticht durch	17	1
20	Teil		1	e20	1	(Konj.) hin gebeugt zu	16	1
21	Lichtstrahlen	(von Stift 2)	4	e21	21	(Konj.) gehen aus von	18	1
				e22	21	(Konj.) treten in	6	1
				m1	e5	in	2	1
				m2	e6	in	7	1
				m3	m2	in	2	1
				m4	9	sorgen für	e9	1
				m5	e12	in	15	1
				m6	e13	in	3	1
				m7	e14	bedeutet	e15	0
				m8	m7	für	2	0
				m9	e17	(Konj.) in	19	1
				m10	2	(Konj.) denkt	e2p	1
				m11	e21	(Konj.) in	7	1
				m12	e22	(Konj.) (und) werden gebeugt	e22	0
				m13	e22	(Konj.) gelangen in	2	1

ho3-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für ho3-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Laserstrahl	Proband	2	e1	1	ist dargestellt	1	1
2	Brechungsindex (Wasser)		3	e2	1	wird gebrochen in	3	1
3	wassergefülltes Gefäß		2	e3	1	hat (Konj.)	5	1
4	Betrachter		2	e4	7	haben	6	1
5	Knick		2	e5	1	passiert zunächst	8	1
6	unterschiedliche Brechungsindizes		3	e6	8	hat	9	1
7	verwendete Medien		3	e7	9	ist ungefähr 1	9	1
8	Luft		2	e8	1	dringt in	10	1
9	Brechungsindex (Luft)		3	e9	10	hat	2	1
10	Wasser		2	e10	2	ist 3	2	0
11	Einfallswinkel		3	e11	11	wird verändert	11	0
12	optische Täuschung		1	e12	4	(erfährt)	12	0
				m1	e3	erscheint optisch für	4	1
				m2	m1	lässt sich erklären durch	e4	1
				m3	e5	anschließend	e8	1
				m4	e7	dagegen	e10	0
				m5	m4	daher	e11	0
				m6	e11	führt zu	e12	0

ho3-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für ho3-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Sehvermögen	menschliches Auge	3	e1	2	hat	1	1
2	Auge		2	e2	3	werden reflektiert an	5	1
3	Lichtstrahlen		3	e3	5	umgeben	4	1
4	Beobachter		2	e4	3	gelangen auf	6	1
5	Gegenstände		2	e5	4	hat	2	1
6	Netzhaut		3	e6	2	hat	6	1
7	Information		3	e7	4	hat	8	1
8	Gehirn		2	e8	3	werden weitergegeben als	7	1
9	optische Täuschung		4	e9	9	entsteht	9	0
10	Gefäß (1)		2	e10	12	befinden sich in ... (und) ...	10, 11	1
11	Gefäß (2)		2	e11	3	passieren	13	1
12	unterschiedliche Medien		3	e12	14	befindet sich in	10	1
13	versch. Brechungsindizes		3	e13	15	erscheint gerade	15	1
14	Luft		2	e14	16	befindet sich sowohl in	14	1
15	Bleistift (1)		2	e15	18	muss passieren	13	1
16	Bleistift (2)		2	e16	16	hat (Konj.)	19	1
17	Wasser		2	m1	e2	und	e4	1
18	Licht		3	m2	e8	an	8	1
19	Knick		2	m3	m2	dabei	e9	0
				m4	e11	da	e10	1
				m5	e12	deshalb	e13	1
				m6	e14	als auch in	17	1
				m7	m6	in	11	1
				m8	e12	dagegen	m7	1
				m9	e16	erscheint	4	1
				m10	e15	daher	m9	0

joi-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für joi-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN			
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T A
1	Münze (1)		2	e1	1	liegt in	2 1
2	Kasten (1)		2	e2	3	kann sehen	2 1
4	Licht		3	e3	4	kann sich bewegen in (/zu)	3 1
5	Linie		3	e4	7	ist zwischen ... (und) ...	1, 3 1
3	Beobachter	Auge	2	e5	6	(wenn) ... ist auf ...	7 1
6	Kastenwand (1)		2	e6	3	sieht nur	6 1
7	gerade Linie		2	e7	8	ist	9 1
8	Medium (1)		3	e8	4	kann sich nur geradlinig bewegen in	8 1
9	Luft		2	e9	10	ist	11 1
10	Medium (2)		3	e10	4	kann sich nur geradlinig bewegen in	10 1
11	Wasser		2	e11	12	wird eigentlich verdeckt von	13 1
12	Münze (2)		2	e12	12	wird sichtbar	12 1
13	Kastenwand (2)		2	e13	12	wird übergossen mit	11 1
14	Phasengrenze		3	e14	4	wird gebeugt an	14 0
15	Lot		3	e15	4	wird gebeugt weg von	15 0
16	Punkt	(von Licht)	3	e16	11	ist optisch dichter	11 1
17	Eindruck		3	e17	4	sollte weiter oben wahrgenommen werden	4 1
18	Punkt	(von Münze)	2	e18	4	kommt weiter unten an an	16 1
19	Kasten (2)		2	e19	17	entsteht für	3 1
20	Erfahrung		2	e20	12	liegt (Konj.) weiter hinten an	18 1
				e21	12	ist plötzlich sichtbar für	3 1
				e22	3	kann nur sehen	12 1
				e23	3	kann schauen über	13 1
				m1	e3	in einer	5 1
				m2	m1	von	1 1
				m3	e2	nur wenn	m2 1
				m4	m3	ohne abgeschirmt zu werden von	6 1
				m5	e5	dann	e6 1
				m6	e12	wenn	e13 1
				m7	m6	liegt an	e14 0
				m8	e15	weil	e16 0
				m9	e20	(ist)	17 1
				m10	e18	sorgt dafür, dass	m9 1
				m11	e22	wenn	e20 1
				m12	e20	sodass	e23 1
				m13	e20	in	19 1
				m14	20	lehrt, dass	m11 1

joi-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für joi-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	optisches dichteres Medium		3	e1	2	breitet sich langsamer aus in	1	1
2	Licht		3	e2	5	ist	1	1
3	Vakuum		4	e3	6	befindet sich anteilig in	5	1
4	Luft		2	e4	6	hat	8	1
5	Wasser		2	e5	7	(kommt) von	8	1
6	Stift		2	e6	7	bewegt sich langsamer in	5	1
7	Licht	(von Stift unter Wasser)	3	e7	8	ist unter	5	1
8	Teil		2	e8	7	(wenn) ... trifft auf	9	1
9	Grenzfläche		3	e9	10	ändert sich	10	1
10	Ausbreitungsgeschwindigkeit		3	e10	7	(wenn) ... stellt man sich vor als	12	1
11	Punkt		3	e11	12	entwickelt sich in	13	1
12	Wellenfront		4	e12	14	haben um sich auszubreiten länger	15	0
13	Elementarwellen		4	e13	12	knickt weg von	18	1
14	ersten Elementarwellen		4	e14	7	wird gebeugt	7	0
15	Zeit		4	e15	7	bewegt sich zu auf	19	1
16	letzten Elementarwellen		4	e16	7	bewegt sich nicht geradlinig	7	1
17	Resultat		3	e17	7	wird geknickt an	20	1
18	Lot		3	e18	6	erscheint geknickt weg vom	18	1
19	Beobachter	Auge	2	e19	7	hat	22	1
20	Phasengrenze		3	e20	22	hat	21	1
21	Richtung		3	m1	e1	als in	3	1
22	Knick		3	m2	m1	oder	m11	1
				m3	e3	so	e6	1
				m4	e8	dann	e9	1
				m5	e10	an	11	1
				m6	e12	als	16	0
				m7	e13	in	17	1
				m8	e16	sondern	e17	1
				m9	e17	und zwar	e18	1
				m10	m9	entsprechend	21	0
				m11	e1	als in	4	1
				m12	e10	so	e12	0

j02-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für j02-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN			
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T A
1	Beobachter		2	e1	1	sieht ... (und) ...	2, 3 1
2	Behälter (1)		2	e2	2	ist gefüllt mit	6 1
3	Behälter (2)		2	e3	2	hat	7 1
4	Münze (1)		2	e4	4	sieht aus als liegt eher in	7 1
5	Münze (2)		2	e5	1	kann komplett sehen	4 1
6	Wasser		2	e6	1	sieht	5 1
7	Mitte		2	e7	4, 5	... (und) ... liegen eigentlich an	9 1
8	Halbte		2	e8	1	(warum?) ... sieht verschoben	4 1
9	selbe Stelle		2	e9	12	(ist zwischen) ... (und) ...	13, 6 1
10	Lichtbrechung		3	e10	11	werden gebrochen an	12 1
11	eintreffende Lichtstrahlen	Strahlen	3	e11	6, 13	... und ... haben	14 1
12	Oberfläche		2	e12	4	hat	15 1
13	Luft		2	e13	15	ist nicht zu sehen in	3 1
14	unterschiedliche Brechzahlen		3	e14	11	erreichen	15 1
15	Teil		2	e15	16	werden verschoben	16 0
16	alle Strahlen		3	m1	e1	mit ... (und) ...	4, 5 1
				m2	e4	wo	e5 1
				m3	e6	nur zu	8 1
				m4	e5	während	m3 1
				m5	e7	in ... (und) ...	2, 3 1
				m6	e8	hat zu tun mit	10 1
				m7	e10	weil	e11 1
				m8	m7	somit	e14 0
				m9	e5	und verschoben in	2 1
				m10	m9	da	e15 0

jo2-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für jo2-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Behälter (1)	Auge	2	e1	1, 2	... (und) ... sind zu sehen mit ... (und) ...	3, 4	1
2	Behälter (2)		2	e2	1	ist leer	1	1
3	Bleistift (1)		2	e3	2	ist gefüllt mit	5	1
4	Bleistift (2)		2	e4	6	sieht normal	3	1
5	Wasser		2	e5	6	sieht gerade	3	1
6	man		2	e6	6	sieht ungerade	4	1
7	Wasseroberfläche		2	e7	4	(Konj.) ist gebrochen ab	7	1
8	Lichtbrechung		3	e8	9	wird reflektiert an	10	1
9	Lichtstrahl		3	e9	10	ist zwischen	11	1
10	Oberfläche		2	e10	9	wird gebrochen an	10	1
11	zwei unterschiedliche Medien		3	e11	12	trifft ein auf	4	1
12	Licht		3	e12	12	wird reflektiert an	4	1
13	Luft		2	e13	12	wird gebrochen an	10	1
14	Brechzahl (1)		3	e14	5	hat	14	1
15	Brechzahl (2)		3	e15	13	hat	15	1
16	Winkel (1)	2	3	e16	14	(ist) unterschiedlich (zu)	15	1
17	eintreffender Lichtstrahl		3	e17	14	(ist) 1,33	14	1
18	Lot		3	e18	15	ist 1,0	15	1
19	Winkel (2)		3	e19	16	ist zwischen ... (und) ...	17, 18	1
20	herauskommender Strahl		3	e20	19	ist zwischen ... (und) ...	18, 20	1
21	Bild		3	e21	10	(ist zwischen) ... (und) ...	5, 13	1
22	Wirklichkeit		2	e22	18	ist senkrecht zu	10	1
				e23	16	gleich nicht mehr	19	1
				e24	12	wurde gebrochen	12	1
				e25	6	sieht	21	1
				e26	21	ist nicht realitätsgemäß	21	1
				e27	4	sieht ungerade aus	4	1
				e28	4	ist nicht ungerade in	22	1
				m1	e4	in	1	1
				m2	e4	also	e5	1
				m3	e6	als	e7	1
				m4	m3	passiert wegen	8	0
				m5	e8	aber auch	e10	1
				m6	e12	bis zu	6	1
				m7	e13	somit	e23	1
				m8	e23	deswegen	e25	1
				m9	e26	sondern	e27	1

jo4-B

Kodierung der Elemente und Beziehungen für jo4-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Effekt		2	e1	2	ist (/ heißt)	1	1
2	optische Brechung		3	e2	3, 4	... (und) ... sind zu erkennen in ... (und) ...	5, 6	1
3	Münze (1)	(in Wasser)	2	e3	5	ist zusätzlich gefüllt mit	7	1
4	Münze (2)		2	e4	3, 4	... (und) ... sind unterschiedlich platziert in ... (und) ...	5, 6	1
5	Box (1)	(mit Wasser, rechts)	2	e5	3	hat	9	1
6	Box (2)		2	e6	8	kann schwieriger erkennen	9	1
7	Wasser		2	e7	1	ist verantwortlich für	10	1
8	Betrachter	Auge	2	e8	11	wird reflektiert von	3	1
9	tatsächliche Platzierung		2	e9	11	fällt ein in (/ zu)	8	1
10	Schwierigkeit		2	e10	11	durch läuft	12	1
11	Licht		3	e11	12	sind ... und ...	7, 13	1
12	Medien		3	e12	11	wird gebrochen an	17	1
13	Luft		2	e13	17	ist zwischen	12	1
14	Austritt		3	e14	14	(erfolgt) aus	15	1
15	dichteres Medium		3	e15	15	(ist)	7	1
16	weniger dichte Medium		3	e16	16	(ist)	13	1
17	Grenze	Trenngrenze	3	e17	18	kommt von	3	1
18	Lichtstrahl		3	e18	18	wird abgelenkt in	19	1
19	Richtung		3	e19	19	(verläuft zu)	17	1
				e20	12	haben	17	1
				e21	3	erscheint versetzt (für)	8	1
				m1	e5	in	5	1
				m2	e6	ist	10	1
				m3	e10	in	5	1
				m4	e14	in	16	1
				m5	e12	ist	2	1
				m6	e18	bei	2	1
				m7	m6	dadurch	e21	0

jo4-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für jo4-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN			
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T A
1	Effekt		2	e1	1	ist (/ heißt)	2 1
2	optische Brechung		3	e2	3, 4	... (und) ... sind zu erkennen in ... (und) ...	5, 6 1
3	Stift (1)	(in Wasser)	2	e3	5	ist zusätzlich gefüllt mit	7 1
4	Stift (2)		2	e4	3	steht in	7 1
5	Box (1)	(rechts, mit Wasser)	2	e5	3	scheint zu haben	9 1
6	Box (2)		2	e6	1	ist verantwortlich für	10 1
7	Wasser		2	e7	3	hat	12 1
8	Halbte		2	e8	11	wird reflektiert an	12 1
9	Knick		2	e9	11	fällt in (/ zu)	13 1
10	Illusion		1	e10	11	durchläuft verschiedene	14 1
11	Licht		3	e11	14	sind ... und ...	7, 15 1
12	unterer Teil		2	e12	11	wird gebrochen an	19 1
13	Betrachter	Auge	2	e13	19	(ist) zwischen	14 1
14	Medien		3	e14	17	(ist)	7 1
15	Luft		2	e15	18	(ist)	15 1
16	Austritt		3	e16	16	(erfolgt) aus	17 1
17	dichteres Medium		3	e17	20	kommt von	23 1
18	weniger dichte Medium		3	e18	21	(verläuft zu)	19 1
19	Grenze	Trenngrenze	3	e19	20	wird abgelenkt in	21 1
20	Lichtstrahl		3	e20	11	wird reflektiert von	22 1
21	Richtung		3	e21	3	erscheint geknickt für	13 1
22	oberer Teil		2	e22	11	wird nicht gebrochen von (/bei)	22 1
23	Münze		1	m1	e4	zur	8 1
				m2	e3	sodass	m1 1
				m3	e5	in	5 1
				m4	e5	ist	10 0
				m5	e10	in	5 1
				m6	e16	in	18 1
				m7	e12	bei	16 1
				m8	e12	ist	2 1
				m9	e19	bei	2 1
				m10	e19	während	e22 1
				m11	m10	dadurch	e21 0

xoi-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für xoi-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Verhalten		3	e1	2	hat	1	1
2	Licht	Laserlicht	3	e2	1	lässt sich modellieren mithilfe von	3	1
3	Strahlen (1)	allg.	3	e3	3	haben	5	1
4	Laser		2	e4	5	geht aus von	4	1
5	Vielzahl		3	e5	7	ist	6	1
6	homogenes Medium		3	e6	3	verlaufen immer geradlinig innerhalb von	6	1
7	Luft		2	e7	4	(hat)	3	1
8	Staubpartikel		2	e8	3	verlaufen parallel	3	1
9	Punkt		3	e9	8	(ist) in	7	1
10	Auftreffen		3	e10	3	(wenn) ... trifft auf	8	1
11	Strahlen (2)	gestreute, neue Strahlen	3	e11	10	hat	9	1
12	gestreutes Licht		3	e12	11	gehen aus von	9	1
13	Raumrichtungen		2	e13	12	ist (/hat)	11	1
14	Teil		3	e14	11	laufen auseinander in alle	13	1
15	Auge	Beobachter	2	e15	11	(haben)	14	1
16	Linse		3	e16	14	erreichen	15	1
17	Ursprungspunkt		3	e17	15	hat	16	1
18	Bildpunkt		3	e18	16	lenkt ab	11	1
19	Netzhaut		3	e19	11	laufen zusammen auf	18	1
20	Spur		3	e20	18	(ist) auf	19	1
21	Punkte		3	e21	20	entsteht von	21	1
22	weiterer Verlauf		2	e22	8	werden getroffen von	3	1
23	Oberfläche		2	e23	11	divergieren von	21	1
24	Wasser		2	e24	2	hat	3	1
25	Regeln		3	e25	3	treffen auf	23	1
26	Brechungsgesetz		3	e26	24	(hat)	23	1
27	Lot		3	e27	26	(hat)	25	1
28	streuende Partikel		3	e28	3	werden schlagartig abgelenkt hin zu	27	1
29	Ursprünge		3	e29	27	(ist) auf	23	1
30	divergierende Strahlen		3	e30	24	ist	6	1
31	Teil	(der div. Strahlen), Strahlen	3	e31	3	verlaufen wieder geradlinig innerhalb	24	1
32	Richtung	(des Auges)	2	e32	28	befinden sich in	24	1
33	Seitenwand		2	e33	30	haben	29	1
34	Aquarium		2	e34	28	(sind)	29	1
35	Grenzflächen		3	e35	30	(haben)	31	1
36	Glas		2	e36	31	verläuft in	32	1
37	abgebildete Konstellation		2	e37	32	(führt zu)	15	1
38	relevante Brechung		3	e38	31	durchstoßen	33	1
39	Stellen		2	e39	34	hat	33	1
				e40	35	(führt nach)	36	1
				e41	35	(führt nach)	7	1
				e42	33	(ist)	35	1
				e43	31	treffen	15	1
				e44	31	durchlaufen nahezu senkrecht	35	1
				e45	38	findet nicht statt an	39	1
				m1	e6	zudem	e8	1
				m2	e10	so	e12	1
				m3	e18	von	17	1
				m4	m3	sodass	e19	1
				m5	e21	und	e22	1
				m6	e23	in alle	13	1
				m7	e25	in	22	1
				m8	e28	entsprechend	25	1
				m9	e40	von	24	1
				m10	e41	von	36	1
				m11	m9	und	m10	1
				m12	e45	entsprechend	26	1
				m13	e44	in	37	1
				m14	e45	weil	e44	1

Kodierung der Elemente und Beziehungen für xoi-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Verhalten		3	e1	2	hat	1	1
2	Licht		3	e2	1	lässt sich modellieren mit Hilfe von	3	1
3	Strahlen	(allg.)	3	e3	11	geht aus von	7	1
4	Raumrichtungen		3	e4	12	geht aus von	8	1
5	Luft		2	e5	13	(ist) auf	14	1
6	Wasser		2	e6	3	haben	15	1
7	Münze (1)	(links)	2	e7	15	geht aus von	13	1
8	Münze (2)	(rechts)	2	e8	3	verlaufen immer geradlinig innerhalb von	16	1
9	Aquarium (1)	(links), luftgefülltes Aq.m	2	e9	17	ist	5	1
10	Aquarium (2)	(rechts), wassergefülltes Aq.	2	e10	17	umgibt	7	1
11	Lichtstrahlen (1)	(links)	3	e11	18	ist	6	1
12	Lichtstrahlen (2)	(rechts), Strahlen	3	e12	18	umgibt	8	1
13	beliebiger Punkt	(allg.)	2	e13	20	hat	19	1
14	Münze (allg.)		2	e14	3	erreichen	19	1
15	Vielzahl		3	e15	19	hat	21	1
16	Medium (allg.)		3	e16	21	lenkt ab	3	1
17	Medium (links)		3	e17	3	(gehen aus von)	22	1
18	Medium (rechts)		3	e18	3	laufen zusammen auf	23	1
19	Auge		2	e19	23	(ist) auf	24	1
20	Beobachter		2	e20	25	haben	26	1
21	Linse		3	e21	7	hat	27	1
22	Ursprungspunkt (allg.)	Punkt	3	e22	25	erreichen	19	1
23	Bildpunkt		3	e23	28	(kommen von)	29	1
24	Netzhaut		3	e24	7	hat	29	1
25	Strahlen (links, hinten)		3	e25	28	sind ausgerichtet in	30	1
26	Ursprung (links, hinten)		3	e26	28	treffen lediglich	31	1
27	hinterer Teil		2	e27	32	hat	31	1
28	Strahlen (links, vorn)		3	e28	7	ist nur halb zu sehen	7	1
29	vorderer Teil		2	e29	10	ist gefüllt mit	6	1
30	Richtung (links, zum Auge)		3	e30	12	ändern schlagartig ihre	35	1
31	Innenseite		2	e31	12	werden weggebrochen von	37	1
32	weiße Aquariumswand		2	e32	37	(ist) auf	34	1
33	Brechungsgesetz		3	e33	12	sind gerichtet zur	34	1
34	Grenzfläche		3	e34	12	verlaufen flacher nach	36	1
35	Richtung (rechts, zum Auge)		3	e35	12	sind nicht gerichtet zu	19	1
36	Wechsel	Medienwechsel	3	e36	12	erreichen	19	1
37	Lot		3	e37	12	sind steiler gerichtet	12	1
38	unveränderlicher Fall		4	e38	12	verlaufen flacher nach	34	1
39	Ursprungspunkt (2)		3	e39	12	verlaufen dann in	35	1
40	Weise		3	e40	12	(kommen von)	22	1
				e41	12	scheinen nicht zu kommen von	22	1
				e42	39	ist höher gelegen	39	1
				e43	39	ist versetzt hin zu	19	1
				e44	12	scheinen zu kommen von	39	1
				e45	22	(sind) auf	8	1
				e46	8	erscheint nach oben und vorn verschoben zu sein	8	1
				e47	8	ist vollständig zu sehen in	10	1
				m1	e3	in	9	1
				m2	e4	in	10	1
				m3	e7	in	4	1
				m4	e9	in	9	1
				m5	e11	in	10	1
				m6	e16	sodass	e18	1
				m7	e20	in	27	1
				m8	e22	im Fall von	9	1
				m9	e25	(zum)	19	1
				m10	e26	deshalb	e28	1
				m11	e30	entsprechend	33	1
				m12	m11	an	34	1
				m13	m12	im Fall von	10	1
				m14	e31	für (/ bei)	36	1
				m15	m14	von	6	1
				m16	m14	nach	5	1
				m17	e31	bis auf	38	1
				m18	e33	von	8	1
				m19	e31	heißt	e34	1
				m20	e35	innerhalb	6	1
				m21	m20	sondern	e37	1
				m22	e39	(zum)	19	1
				m23	e41	sondern	e44	1
				m24	m23	für	19	1
				m25	m24	gilt für alle	22	1
				m26	e46	da	m25	1
				m27	e36	für jeden	22	1
				m28	m27	auf	40	1
				m29	m24	ist	40	1
				m30	e47	weil	m28	1

xoi-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für xoi-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Verhalten		3	e1	2	hat	1	1
2	Licht		3	e2	1	lässt sich modellieren mithilfe von	3	1
3	Strahlen	Lichtstrahlen	3	e3	4	ist in	6	1
4	Bleistift (li)		2	e4	5	ist in	7	1
5	Bleistift (re)		2	e5	3	gehen aus von ... (und) ...	4, 5	1
6	Aquarium (li)	Fall des li. Aquariums	2	e6	8	(wenn) ... betrachtet	9	1
7	Aquarium (re)		2	e7	9	(ist) auf	10	1
8	man	Auge des Beobachters	2	e8	3	(haben)	11	1
9	beliebiger Punkt		3	e9	11	gehen aus in alle	12	1
10	Stift	(allg.)	2	e10	3	verlaufen immer geradlinig innerhalb	13	1
11	Vielzahl		3	e11	14	befinden sich in	13	1
12	Raumrichtungen		2	e12	10	hat	14	1
13	Medium	homogenes Medium	3	e13	16	gehen aus von	14	1
14	Punkte		3	e14	16	verlaufen in	17	1
15	Luft		2	e15	17	(führt zu)	8	1
16	einige Strahlen		3	e17	22	werden zusammengeführt von	19	1
17	Richtung		2	e18	20	ist auf	21	1
18	Ursprungspunkt		3	e19	22	erreichen	8	1
19	Augenlinse		3	e20	22	durchlaufen ausschließlich	15	1
20	Bildpunkt		3	e21	15	ist	13	1
21	Netzhaut		3	e22	22	durchlaufen teilweise auch	23	1
22	Strahlen	(ins Auge)	3	e23	24	(ist zwischen) ... und ...	23, 15	1
23	Wasser		2	e24	22	ändern schlagartig	26	1
24	Grenzfläche		3	e25	22	werden weg gebrochen von	28	1
25	Brechungsgesetz		3	e26	28	(ist) auf	24	1
26	Richtung		3	e27	27	(ist) von	23	1
27	Wechsel	Medienwechsel	3	e28	22	sind gerichtet zu	24	1
28	Lot		3	e29	5	hat	30	1
29	senkrechter unveränderlicher Fall		4	e30	22	verlaufen flacher nach	27	1
30	unterer Teil	(des rechten Stiftes)	2	e31	22	sind nicht gerichtet zu	8	1
31	Ursprung	(höher)	3	e32	22	sind steiler gerichtet	22	1
				e33	22	verlaufen flacher nach	24	1
				e34	22	scheinen nicht zu kommen von	18	1
				e35	22	(kommen von)	18	1
				e36	22	scheinen zu kommen von	31	1
				e37	31	ist höher gelgen	31	1
				e38	31	ist etwas versetzt hin zu	8	1
				e39	5	scheint nach oben und leicht nach vorn geknickt	5	1
				m1	e9	von	9	1
				m2	e6	so	m1	1
				m3	e17	auf	20	1
				m4	e20	in	6	1
				m5	e22	in	7	1
				m6	e24	an	24	1
				m7	m6	entsprechend	25	1
				m8	e27	nach	15	1
				m9	e25	für	27	1
				m10	m9	bis auf	29	1
				m11	e28	von	30	1
				m12	e25	heißt	e30	1
				m13	e31	in	23	1
				m14	m13	sondern	e32	1
				m15	e33	und dann in	17	1
				m16	e34	für	8	1
				m17	e34	sondern	e36	1
				m18	m17	gilt für alle	18	1
				m19	e39	da	m18	1

x02-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für x02-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Lichtbündel		3	e1	1	trifft auf	2	1
2	optische Grenzfläche		3	e2	1	hat	3	1
3	Ausbreitungsrichtung		3	e3	1	wird geändert in	3	1
4	Lot		3	e4	5	hat	7	1
5	Licht		3	e5	8	ist zwischen ... (und) ...	9, 10	1
6	Medien	(allg.),	3	e6	1	trifft auf	8	1
7	charakt. Ausbreitungsgeschw'en	(Licht-)Geschwindigkeit	3	e7	7	ändert sich	7	1
8	Grenze	(ebene) Mediengrenze	3	e8	7	ist maximal in	11	1
9	Medium (1)		3	e9	6	hat	13	1
10	Medium (2)		3	e10	7	nimmt ab mit	13	1
11	Vakuum		3	e11	14	gibt es	14	1
12	erste Näherung		3	e12	17	ergibt sich aus	16	1
13	Dichte		3	e13	7	hat (/vollzieht)	16	1
14	Ausnahmen		3	e14	15	ist	18	1
15	Huygenssches Prinzip		3	e15	18	beschreibt	1	1
16	Änderung		3	e16	20	wird zusammenges. beschrieben aus	21	1
17	Richtungsänderung		3	e17	21	hat	22	1
18	Modellierung		3	e18	22	ergibt	20	1
19	Ausbreitung		3	e19	20	trifft auf	8	1
20	ebene Wellenfront		3	e20	21	breiten sich langsamer aus in	24	1
21	Elementarwellen	Welle	3	e21	19	(unterliegt)	17	1
22	Einhüllende		3	e22	20	(erfährt)	19	1
23	dünnere Medium	weniger dichtes Medium	3	e23	17	ergibt sich	17	1
24	dichtere Medium		3	e24	21	setzt man zusammen	21	1
25	geometrische Betrachtung		3	e25	21	pflanzt sich wieder geradlinig fort in	24	1
26	beschriebener Fall		3	m1	e3	hin zu	4	1
27	Winkel		3	m2	e4	in	6	1
				m3	e6	dann	e7	1
				m4	e10	in	12	1
				m5	m4	aber	e11	1
				m6	e12	nach	15	1
				m7	m6	an	8	1
				m8	e15	als	19	1
				m9	m8	von	20	1
				m10	m9	dabei	e16	1
				m11	e19	von	23	1
				m12	m11	unter	27	1
				m13	m12	zu	24	1
				m14	m13	dann	e20	1
				m15	e20	als in	23	1
				m16	e23	wenn	e24	1
				m17	m1	in	26	1
				m18	e23	aus	25	1

x02-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für x02-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Teil I	(linkes Becken)	2	e1	4	hat	3	1
2	Licht		3	e2	2	fällt direkt in	7	1
3	Stellen		2	e3	5	ist	6	1
4	Stift (li)		2	e4	4	hat	8	1
5	Richtungsänderung		3	e5	7	würde erstasten	8	1
6	Medienwechsel		3	e6	4	erscheint in	8	1
7	Auge	ich, man	2	e7	10	ragt in	11	1
8	reale Form		2	e8	11	hat größere	12	1
9	Teil II		2	e9	10	hat	13	1
10	Stift (re)		2	e10	13	ist außerhalb	14	1
11	Medium	n2	3	e11	15	gilt für	13	1
12	optische Dichte		3	e12	10	hat	17	1
13	Teil	(des Bleistift rechts)	2	e13	16	wird ausgesendet von	17	1
14	Wasser		2	e14	17	befinden sich in	11	1
15	Ausführung		3	e15	16	erfährt	5	1
16	Licht	(rechts)	3	e16	7	nimmt wahr	18	1
17	Stellen	(des Bleistift rechts)	2	e17	9	ist	21	1
18	Punkt A		3	e18	21	hat	20	1
20	Geometrie		3	e19	10	hat	22	1
21	Aufbau		2	e20	22	erscheint oberhalb an	23	1
22	Spitze		2	e21	24	lässt sich anstellen für jeden	25	1
23	Stelle A'		3	e22	25	ist z.B.	26	1
24	Überlegung		3	e23	25	befindet sich auf	10	1
25	beliebiger Punkt		3	e24	28	(wird gehoben zu)	29	1
26	B		3	e25	28	hat	30	1
27	Hebung		2	e26	27	hängt ab von	30	1
28	Punkt P		3	e27	10	hat	33	1
29	P'		3	e28	33	ergibt sich aus	34	1
30	Tiefe		3	e29	35	haben	34	1
31	andere Stelle		3	e30	25	haben	35	1
32	Mediengrenze		3	e31	10	erscheint geknickt in	36	1
33	wahrgenommenes Bild		2	e32	36	ist auf	32	1
34	Summe		3	e33	27	findet nicht statt oberhalb von	32	1
35	Bilder		3	e34	27	findet statt unterhalb von	32	1
36	Punkt C		3	m1	e2	von allen	3	1
				m2	m1	ohne	5	1
				m3	m2	in	1	1
				m4	e7	in	9	1
				m5	m3	ist	15	1
				m6	e16	an	31	1
				m7	m6	als sich befindet	18	1
				m8	e20	in	29	1
				m9	m8	in	20	1
				m10	m9	ist	24	1
				m11	e23	in	11	1
				m12	e24	ist	27	1
				m13	e25	unterhalb von	32	1
				m14	7	stellt fest, dass	e26	1
				m15	e21	dabei	m14	1
				m16	m15	deshalb	e31	1

x03-A

Kodierung der Elemente und Beziehungen für x03-A

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN					
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A	
1	Laserstrahl	abgelenkter Laserstrahl	2	e1	1	ist zu sehen von	2	1	
2	Seite		2	e2	1	leuchtet von schräg oben in	3	1	
3	Aquarium		2	e3	1	knickt ab zum	6	1	
4	Eintauchen		2	e4	7	hat	6	1	
5	Wasser		2	e5	1	verläuft geradlinig weiter bis zu	8	1	
6	Lot		3	e6	1	(erfährt)	10	1	
7	Wasseroberfläche		2	e7	12	(hat)	11	1	
8	Aquariumsboden		2	e8	9	(erfolgt auf)	10	1	
9	Bezug		2	e9	13	gibt es zu erklären in	9	1	
10	Abknicken		2	e10	1	kann aufgefasst werden als	14	1	
11	Strahlenmodell		Lichtstrahlenmodell	3	e11	16	(tritt auf) an	17	1
12	Licht			3	e12	16	gilt für	15	1
13	nichts			3	e13	1	ist gerade so sichtbar wie abgebildet	1	1
14	schmales Lichtstrahlenbündel	Laserlichtbündel	3	e14	14	wird gestreut sowohl an ... als auch an ...	19, 5	1	
15	Lichtstrahlen	Auge	3	e15	14	passiert	20	1	
16	Brechung		3	e16	15	werden ausgesandt von	20	1	
17	Grenzfläche		3	e17	15	(haben)	22	1	
18	Snellius'sches Gesetz		3	e18	22	erreichen	23	1	
19	Luft		2	e19	22	gehen aus von	20	1	
20	Stellen		Laserstellen	2	e20	22	werden selbst wieder gebrochen an	25	1
21	Umgebung			2	e21	3	hat	25	1
22	einige (Lichtstrahlen)		3	e22	22	treffen fast senkrecht auf	26	1	
23	Betrachter		2	e23	16	ist gering	16	1	
24	Austreten		3	e24	16	zeigt keinerlei	27	1	
25	Vorderseite		2	m1	e3	bei	4	1	
26	Grenzfläche		3	m2	m1	in	5	1	
27	Auswirkungen		2	m3	e3	dann	e5	1	
			m4	e9	denn	e10	1		
			m5	e11	gemäß	18	1		
			m6	e10	und	e12	1		
			m7	11	mit ... kann ausführlicher gesprochen werden über	e13	1		
			m8	e16	in	21	1		
			m9	e19	in	5	1		
			m10	e20	bei	24	1		
			m11	e23	sodass	e24	1		
			m12	e23	da	e22	1		

Kodierung der Elemente und Beziehungen für x03-B

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN				
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A
1	Terrarium		2	e1	1	ist links v.o. zu sehen	1	1
2	Aquarium		2	e2	2	ist rechts v.o. zu sehen	2	1
3	Größe		2	e3	1, 2	... und ... haben gleiche	3	1
4	Boden (1)	(im Terrarium)	2	e4	1	(hat)	4	1
5	Boden (2)	(im Aquarium)	2	e5	2	(hat)	5	1
6	Münze (1)	(im Terrarium)	2	e6	6	liegt auf	4	1
7	Münze (2)	(im Aquarium)	2	e7	7	liegt auf	5	1
8	Vorderkante		2	e8	1, 2	... und ... haben	8	1
9	hintere Bodenkante (1)	(im Aquarium)	2	e9	6, 7	liegen vermutlich tastbar in gleicher	37	1
10	Vergleich		2	e10	7	ist in	1	1
11	hintere Bodenkante (2)	(im Terrarium)	2	e11	6	ist in	2	1
12	Ferne		2	e12	7	wird gesehen deutlich hinter	6	1
13	senkrechte Kanten		2	e13	2	(hat)	9	1
14	Wasseroberfläche	Wasserspiegel	2	e14	1	(hat)	11	1
15	Wasser		2	e15	9	scheint verschoben zu sein in	12	1
16	Stelle	(auf Münze im Terrarium)	2	e16	2	hat	13	1
17	Lichtstrahlen (li.)		3	e17	13	werden gerade und ungeknickt gesehen	13	1
18	Richtungen		2	e18	5	liegt unter	15	1
19	Teil		3	e19	5	wird gehoben gesehen mitsamt	7	1
20	Betrachter	Auge, Auge des Betrachters	2	e20	6	(hat)	16	1
21	Augenlinse		3	e21	17	breiten sich geradlinig aus von jeder	16	1
22	Netzhaut		3	e22	17	hat	19	1
23	Stellen	(auf der Münze im Aquarium)	2	e23	19	gelangt in (/zu)	20	1
24	Lichtstrahlen (re.)		3	e24	19	wird gebrochen in	21	1
25	Durchqueren		3	e25	4	wird abgebildet auf	22	1
26	Blickwinkel		2	e26	6	liegt tastbar	6	1
27	Strahlen	(im Blickwinkel)	3	e27	38	ist anders bei	7	1
28	Snellius'sches Gesetz		3	e28	7	hat	23	1
29	Lot		3	e29	24	breiten sich aus von allen	23	1
30	Folge		3	e30	24	werden gebrochen bei	25	1
31	Terrariumsfall		2	e31	26	wird eingenommen auf	14	1
32	Brechung		3	e32	27	interessieren für	26	1
33	Aquariumsfall		2	e33	27	werden gebrochen gemäß	28	1
34	Gesamtheit		2	e34	17	erreichen (re.) nicht	20	1
35	Sichtinhalt		2	e35	17	kommen von	7	1
36	geometrische Gründe		3	e36	27	hätten hinweg geleuchtet über	20	1
37	Entfernung		2	e37	27	erreichen	20	1
38	Sache		2	e38	27	knicken nach unten ab und erreichen	20	1
				e39	17	leuchten jetzt (re.) hindurch unter	20	1
				e40	27	durchqueren	14	1
				e41	17	(treten auf bei)	31	1
				e43	35	hat	34	1
				e44	35	wird zusammengestaucht hin zu	14	1
				e45	7	liegt dreidimensional höher als	6	1
				m1	e9	von	8	1
				m2	e12	trifft auch zu auf	9	1
				m3	m2	in	10	1
				m4	m3	zu	11	1
				m5	e19	senkrecht hin zu	14	1
				m6	e17	deutet darauf hin, dass	m5	1
				m7	e21	in alle	18	1
				m8	e24	sodass	e25	1
				m9	6	wird gesehen, wo	e26	1
				m10	m7	und	m8	1
				m11	m10	deshalb	m9	1
				m12	m11	ist	38	1
				m14	e29	in alle	18	1
				m15	e30	von	14	1
				m16	e33	weg von	29	1
				m17	m16	hat	30	1
				m18	e34	wie in	31	1
				m19	e36	ohne	32	1
				m20	m19	an	14	1
				m21	e34	sondern	e37	1
				m22	e38	während	e39	1
				m23	e37	in	33	1
				m24	e40	hinter	17	1
				m25	e37	denn	e38	1
				m26	m24	deswegen	e12	1
				m27	e44	gilt für	34	1
				m28	e44	also gehoben	e44	1
				m29	e45	aber zweidimensional	e12	1

x03-C

Kodierung der Elemente und Beziehungen für x03-C

ELEMENTE				BEZIEHUNGEN					
ID	LABEL	SYNONYME	CODE	ID	S	LABEL	T	A	
1	Terrarium		2	e1	1	ist links v.o. zu sehen	1	1	
2	Aquarium		2	e2	2	ist rechts v.o. zu sehen	2	1	
3	Größe		2	e3	1, 2	... und ... haben gleiche	3	1	
4	hintere Wand (li.)		2	e4	1	hat	4	1	
5	hintere Wand (re.)		2	e5	2	hat	5	1	
6	Stift (li.)		2	e6	6	lehnt schräg vor	4	1	
7	Stift (re.)		2	e7	7	lehnt schräg vor	5	1	
8	Wasseroberfläche		2	e8	7	ist in	2	1	
9	Teil	(des Stiftes re.)	2	e9	7	knickt an	8	1	
10	Wasser		2	e10	7	hat	9	1	
11	Vergleich		2	e11	9	ist unter	10	1	
12	Stellen (re.)		2	e12	9	ist nach oben verschoben	9	1	
13	Aquariumsfall		2	e13	6, 7	(... und ... haben)	11	1	
14	Stellen (li.)		2	e14	9	(hat)	12	1	
15	Terrariumsfall		2	e15	7	ist unter	10	1	
16	Gleiche		2	e16	6	(hat)	14	1	
17	Münze	kleine Münzen	1	e17	12	werden gesehen hinter	14	1	
18	Münzenstapel		1	e18	12	(sind in)	13	1	
19	oben beschriebene Gründe		2	e19	14	(sind in)	15	1	
20	Abknickverhalten		2	e20	16	trifft zu auf alle	12	1	
21	man		2	e21	21	kann sich vorstellen ... (und) ...	6, 7	1	
				e22	18	zeigt gleiches	20	1	
				m1	e17	in	11	1	
				m2	e20	wie auf	17	1	
				m3	e22	wie	7	1	
				m4	e21	zusammengesetzt aus vielen kleinen	17	1	
				m5	m4	oder	e22	1	
				m6	e22	aus	19	1	

F.3 KODIERUNGEN DURCH ZWEI BEURTEILER

aoi-A

Kodierung der Elemente für aoi-A

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Licht	3	3	
2	Grenzfläche	3	3	
3	Stoff 1	2	2	Medium 1
4	Stoff 2	2	2	Medium 2
5	charakteristische Brechungsphänomene	3	3	
6	Wellennatur	3	3	
7	Ursache	3	3	
8	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1)	3	3	typische Lichtgeschwindigkeit 1
9	Ausbreitungsgeschwindigkeit (2)	3	3	typische Lichtgeschwindigkeit 2
10	stofflicher Aufbau	3	3	
11	Vakuumlichtgeschwindigkeit	3	3	
12	Strahlenoptik	3	3	
13	Brechungswinkel	3	3	
14	Snellius'sches Brechungsgesetz	3	3	
15	Einfallswinkel	3	3	
16	Ausfallswinkel	3	3	
17	Brechungskoeffizient (1)	3	3	
18	Brechungskoeffizient (2)	3	3	
19	$\sin(\theta_1)/\sin(\theta_2)$	3	0	
20	n_1/n_2	3	0	
21	Beziehung	3	3	
22	Strahl	3	3	
23	Richtung (1)	3	3	(Richtung zum Lot)
24	Lot	3	3	
25	Übergang 1	3	3	
26	dünneres Medium	3	3	dünn
27	dichteres Medium	3	3	dicht
28	Übergang 2	3	0	
29	n_1 kleiner als n_2	3	0	
30	Beobachtungswinkel	2	3	
31	Ausbreitungsrichtung	3	3	
32	Laserstrahl	2	2	gebündelter Laser
33	Brechung	3	3	
34	Wasser	2	2	
35	Photonen	3	3	
36	Richtung (2)	2	0	(Richtung zum Beobachter)
37	Grenzfläche (1)	3	0	(Wasser / Glas)
38	Glas	2	2	
39	Luft	2	2	
40	Grenzfläche (2)	3	0	(Glas / Luft)
41	einzigste Stelle	2	2	
42	Beobachter	2	2	
43	$\sin(\theta_1)$	0	3	
44	$\sin(\theta_2)$	0	3	
$\kappa_{a01-A} = 0,52$				

Kodierung der Beziehungen für a01-A

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C ₂	ID	S	Label	T	C ₁
e1	2	(ist zwischen ... und ...)	3, 4	e2	e1	1	fällt auf	2	e2
e2	1	fällt auf	2	e1	e2	3 / 4	haben	2	e1
e3	5	lassen sich beobachten	5	e3	e3	5	lassen sich beobachten	5	e3
e4	1	hat	6	e5	e4	5	können verstanden werden als Beispiel für	6	e5
e5	5	können als Bsp. verstanden werden für	6	e4	e5	1	hat	6	e6
e6	1	hat	8	e7	e6	7	ist unterschiedliche (...) und (...)	8 / 9	-
e7	1	hat	9	e7	e7	1	hat	8 / 9	-
e8	8	(ist) unterschiedlich (zu)	9	-	e8	8	ist in	3	-
e9	8	ist typisch für	3	-	e9	9	ist in	4	-
e10	9	ist typisch für	4	-	e10	3 / 4	haben	10	e11
e11	3, 4	... (und) ... haben	10	e10	e11	10	führt zu (...) für (...)	8 / 3	e31
e12	8, 9	sind geringer als	11	e13	e12	10	führt zu (...) für (...)	9 / 4	e31
e13	13	kann berechnet werden mit Hilfe von	14	m4	e13	8 / 9	ist immer geringer als	11	e12
e14	15, 16	werden in gesetzt in	21	e15	e14	13	kann berechnet werden in	12	m7
e15	19	ist gleich	20	e16	e15	14	setzt (...) und (...) in (...)	15 / 16 / 21	-
e16	24	hat	23	e18	e16	19	entspricht	20	e15
e17	22	wird gebrochen in	23	e17	e17	22	wird hingebrochen in	23	e17
e18	25	(ist) zu	27	e19	e18	24	hat	23	e16
e19	25	(ist)	29	-	e19	25	geschieht von (...) zu (...)	26 / 27	-
e20	22	(wird gebrochen weg von)	24	e20	e20	22	wird gebrochen von (...) weg bei (...) von dicht zu dünn	24 / 28	-
e21	30	steht senkrecht auf	31	e21	e21	30	steht senkrecht auf	31	e21
e22	32	hat	31	e22	e22	32	hat	31	e22
e23	33	tritt nicht zusätzlich auf	33	e23	e23	33	tritt nicht zusätzlich auf	33	e23
e24	35	werden gestreut vom	34	e25	e24	35	gehen durch (...) und (...) in (...)	37 / 40 / 36	-
e25	42	hat	36	e31	e31	42	hat	36	e25
e26	37	(ist zwischen ... und ...)	34, 38	e26	e25	35	werden gestreut an	34	e24
e27	40	(ist zwischen ... und ...)	38, 39	e27	e26	37	ist zwischen (...) und (...)	34 / 38	e26
e28	15	ist hier o	15	e28	e27	40	ist zwischen (...) und (...)	38 / 39	e27
e29	32	trifft auf	34	e30	e28	15	ist gleich null	15	e28
e30	33	tritt auf an	41	e29	e29	33	tritt auf an	41	e30
m1	e2	(wenn) dann	e3	m1	e30	41	ist dort wo (...) auf (...) trifft	32 / 34	-
m2	e6	in	3	e8	m1	e1	so	e3	m1
m3	e7	in	4	e9	m2	7	für	e3	-
m4	e8	ist	7	-	m3	e11 / e12	jedoch	e13	m20
m5	m4	für	e3	m2	m4	e14	mithilfe	14	e13
m6	e11	führt zu ... (und) ...	e9, e10	-	m5	e15	über (...) und (...)	17 / 18	m8
m7	e13	in	12	e14	m6	e17	wenn (...) und (...)	e19 / 29	m12
m8	e14	über ... (und) ...	17, 18	m5	m7	m4	dabei	m6 / e20	-
m9	m8	durch	14	m4	m8	e23	da	e21	m14
m10	21	(ist)	e15	-	m9	m8	wenn	e24	-
m11	e18	von	26	e19	m10	m9	da	e28	m18
m12	e18	dann	e17	m6	m11	m10	daher	e30	-
m13	e20	bei	28	e20					
m14	e23	da	e21	m8					
m15	e24	in	36	e24					
m16	e24	durch ... (und) ...	37, 40	e24					
m17	e23	wenn	m16	-					
m18	m17	da	e28	m10					
m19	e30	dort wo	e29	e30					
m20	m6	jedoch	e12	-					
m21	m19	daher	e30	-					
$n(c1 \in C2)_{a01-A} = 41/50$					$n(c2 \in C1)_{a01-A} = 29/42$				

Kodierung der fachlichen Korrektheit für a01-A

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
e1	Grenzfläche	(ist zwischen ... und ...)	Stoff 1, Stoff 2	1	1
e2	Licht	fällt auf	Grenzfläche	1	1
e3	charakteristische Brechungsphänomene	lassen sich beobachten	charakteristische Brechungsphänomene	0	1
e4	Licht	hat	Wellennatur	1	1
e5	charakteristische Brechungsphänomene	können als Bsp. verstanden werden für	Wellennatur	1	1
e6	Licht	hat	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1)	1	1
e7	Licht	hat	Ausbreitungsgeschwindigkeit (2)	1	1
e8	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1)	(ist) unterschiedlich (zu)	Ausbreitungsgeschwindigkeit (2)	1	1
e9	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1)	ist typisch für	Stoff 1	1	1
e10	Ausbreitungsgeschwindigkeit (2)	ist typisch für	Stoff 2	1	1
e11	Medium 1, Medium 2	... (und) ... haben	stofflicher Aufbau	1	1
e12	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1), Ausbreitungsgeschwindigkeit (2)	sind geringer als	Vakuumlichtgeschwindigkeit	1	1
e13	Brechungswinkel	kann berechnet werden mit Hilfe von	Snellius'sches Brechungsgesetz	1	1
e14	Einfallswinkel, Ausfallswinkel	... und ... werden in gesetzt in	Beziehung	1	1
e15	$\sin(\theta_{\text{e1}})/\sin(\theta_{\text{e2}})$	ist gleich	n_1/n_2	0	0
e16	Lot	hat	Richtung (1)	1	0
e17	Strahl	wird gebrochen in	Richtung (1)	1	1
e18	Übergang 1	(führt) zu	dichteres Medium	1	1
e19	Übergang 1	(entspricht)	n_1 kleiner als n_2	1	1
e20	Strahl	(wird gebrochen weg von)	Lot	1	1
e21	Beobachtungswinkel	steht senkrecht auf	Ausbreitungsrichtung	1	0
e22	Laserstrahl	hat	Ausbreitungsrichtung	1	1
e23	Brechung	tritt nicht zusätzlich auf	Brechung	1	1
e24	Photonen	werden gestreut vom	Wasser	1	1
e25	Beobachter	hat	Richtung (2)	1	1
e26	Grenzfläche (1)	(ist zwischen ... und ...)	Wasser, Glas	1	1
e27	Grenzfläche (2)	(ist zwischen ... und ...)	Glas, Luft	1	1
e28	Einfallswinkel	ist hier 0	Einfallswinkel	1	1
e29	Laserstrahl	trifft auf	Wasser	1	1
e30	Brechung	tritt auf an	einzig Stelle	1	1
m1	Licht fällt auf Grenzfläche	(wenn) dann	charakteristische Brechungsphänomene lassen sich beobachten	0	1
m2	Licht hat Ausbreitungsgeschwindigkeit (1)	in	Medium (1)	1	1
m3	Licht hat Ausbreitungsgeschwindigkeit (2)	in	Medium (2)	1	1
m4	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1) (ist) unterschiedlich (zu) Ausbreitungsgeschwindigkeit (2)	ist	Ursache	1	1
m5	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1) (ist) unterschiedlich (zu) Ausbreitungsgeschwindigkeit (2) ist Ursache	für	charakteristische Brechungsphänomene lassen sich beobachten	0	1
m6	Medium 1, Medium 2 ... (und) ... haben stofflicher Aufbau	führt zu ... (und) ...	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1) ist typisch für Stoff 1, Ausbreitungsgeschwindigkeit (2) ist typisch für Stoff 2	1	1
m7	Brechungswinkel kann berechnet werden mit Hilfe von Snellius'sches Brechungsgesetz	in	Strahlenoptik	1	1
m8	Einfallswinkel, Ausfallswinkel ... und ... werden in gesetzt in Beziehung	über ... (und) ...	Brechungskoeffizient (1), Brechungskoeffizient (2)	1	1
m9	Einfallswinkel, Ausfallswinkel ... und ... werden in gesetzt in Beziehung über ... (und) ... Brechungskoeffizient (1), Brechungskoeffizient (2)	durch	Snellius'sches Brechungsgesetz	1	1
m10	Beziehung	(ist)	$\sin(\theta_{\text{e1}})/\sin(\theta_{\text{e2}})$ ist gleich n_1/n_2	0	0
m11	Übergang 1 (führt) zu dichteres Medium	von	dünneres Medium	1	1
m12	Übergang 1 (führt) zu dichteres Medium von dünneres Medium	dann	Strahl wird gebrochen in Richtung (1)	1	1
m13	Strahl (wird gebrochen weg von) Lot	bei	Übergang 2	1	1
m14	Brechung tritt nicht zusätzlich auf	da	Beobachtungswinkel steht senkrecht auf Ausbreitungsrichtung	0	0
m15	Photonen werden gestreut vom Wasser	in	Richtung (2)	1	1
m16	Photonen werden gestreut vom Wasser	gehen durch ... (und) ...	Grenzfläche (1), Grenzfläche (2)	1	1
m17	Brechung tritt nicht zusätzlich auf	wenn	Photonen werden gestreut vom Wasser gehen durch ... (und) ... Grenzfläche (1), Grenzfläche (2)	1	1
m18	Brechung tritt nicht zusätzlich auf wenn Photonen werden gestreut vom Wasser gehen durch ... (und) ... Grenzfläche (1), Grenzfläche (2)	da	Einfallswinkel ist hier 0	1	1
m19	Brechung tritt auf an einzige Stelle	daher dort wo	Laserstrahl trifft auf Wasser	1	1
m20	Medium 1, Medium 2 ... (und) ... haben stofflicher Aufbau führt zu ... (und) ... Ausbreitungsgeschwindigkeit (1) ist typisch für Stoff 1, Ausbreitungsgeschwindigkeit (2) ist typisch für Stoff 2	jedoch	Ausbreitungsgeschwindigkeit (1), Ausbreitungsgeschwindigkeit (2) sind geringer als Vakuumlichtgeschwindigkeit	1	1

a03-B

Kodierung der Elemente für a03-B

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	optischer Effekt	3	3	
2	Brecheneigenschaften	3	3	
3	Stoff 1	2	2	Luft
4	Stoff 2	2	2	Wasser
5	Stoffdichte (Wasser)	4	3	
6	Stoffdichte (Luft)	4	3	
7	Licht	3	3	es
8	Durchqueren	3	2	Durchquerung
9	Grenzschicht	3	3	
10	optisch dünneres Material	3	3	
11	optisch dichteres Material	3	3	
12	Lot	3	3	
13	imaginäre Linie	3	3	
14	Oberfläche	2	2	
15	Ort	3	3	(der Durchquerung)
16	Lichtstrahl	3	3	
17	Ausfallswinkel	3	3	
18	Einfallswinkel	3	3	
19	Münze	2	2	
20	anderer Ort	2	2	(der Münze)

$$n_{a03-B} = 0,68$$

Kodierung der Beziehungen für a03-B

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C1	ID	S	Label	T	C1
e1	3, 4	... (und) ... haben	2	e3	e1	1	ist hier gut zu beobachten	1	e3
e2	1	ist zurückzuführen auf	2	e2	e2	1	lässt sich zurückführen auf	2	e2
e3	1	kann hier gut beobachtet werden	1	e1	e3	3 / 4	haben	2	e1
e4	3	hat	5	-	e4	4	besitzt	5	-
e5	4	hat	6	-	e5	3	besitzt	6	-
e6	3	ist unterschiedlich (zu)	4	-	e6	5	ist temperatur- und stoffspezifisch	5	e7
e7	5, 6	... (und ...) sind temperatur- und stoffspezifisch	5, 6	-	e7	6	ist temperatur- und stoffspezifisch	6	e7
e8	4	ist optisch dichter als	3	e8	e8	4	ist wesentlich optisch dichter als	3	e8
e9	7	wird gebrochen bei	8	e9	e9	7	wird bei (...) der (...) gebrochen	8 / 9	-
e10	3, 4	... (und) ... haben	9	e10	e10	3 / 4	haben	9	e10
e11	7	bewegt sich zu	10	e11	e11	7	bewegt sich von (...) zu (...)	11 / 10	-
e12	7	wird weggebrochen von	12	e12	e12	7	wird weggebrochen von	12	e12
e13	12	ist	13	e13	e13	12	ist	13	e13
e14	13	befindet sich orthogonal zu	14	e14	e14	13	befindet sich orthogonal zu (...) an (...)	14 / 15	-
e15	8	hat	15	e15	e15	8	hat	15	e15
e16	17	ist größer als	18	e17	e16	16	hat	8	-
e17	19	wirkt an	29	e18	e17	17	ist größer als	18	e16
m1	e6	definiert	2	-	e18	19	scheint sich zu befinden an	29	e17
m2	e9	von	9	e9	m1	e4 / e5	definieren	2	-
m3	e9	da	e8	m2	m2	e8	da	e9	m3
m4	e11	von	11	e11	m3	e12	da	e11	m5
m5	m4	dadurch	e12	m3	m4	m 3	somit	e17	m8
m6	e15	(von)	16	-	m5	m4	deshalb	e18	m9
m7	e14	an	15	e14					
m8	e12	somit	e16	m4					
m9	m8	deshalb	e17	m5					

$$n(c1 \in C2)_{a03-B} = 20/26$$

$$n(c2 \in C1)_{a03-B} = 16/23$$

Kodierung der fachlichen Korrektheit für a03-B

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
e1	Stoff 1, Stoff 2	... (und) ... haben	Brecheigenschaften	1	1
e2	optischer Effekt	ist zurückzuführen auf	Brecheigenschaften	1	1
e3	optischer Effekt	kann hier gut beobachtet werden	optischer Effekt	1	1
e4	Stoff 1	hat	Stoffdichte (Luft)	1	1
e5	Stoff 2	hat	Stoffdichte (Wasser)	1	1
e6	Stoffdichte (Wasser)	ist unterschiedlich (zu)	Stoffdichte (Luft)	1	1
e7	Stoffdichte (Wasser), Stoffdichte (Luft)	... (und ...) sind temperatur- und stoffspezifisch	Stoffdichte (Wasser), Stoffdichte (Luft)	1	1
e8	Stoff 2	ist optisch dichter als	Stoff 1	1	1
e9	Licht	wird gebrochen bei	Durchqueren	1	1
e10	Stoff 1, Stoff 2	... (und) ... haben	Grenzschicht	1	1
e11	Licht	bewegt sich zu	optisch dünneres Material	1	1
e12	Licht	wird weggebrochen von	Lot	1	1
e13	Lot	ist	imaginäre Linie	1	1
e14	imaginäre Linie	befindet sich orthogonal zu	Oberfläche	1	1
e15	Durchqueren	hat	Ort	1	1
e16	Ausfallswinkel	ist größer als	Einfallswinkel	1	1
e17	Münze	wirkt an	anderer Ort	1	1
m1	Stoffdichte (Wasser) ist unterschiedlich (zu) Stoffdichte (Luft)	definiert	Brecheigenschaften	0	1
m2	Licht wird gebrochen bei Durchqueren	von	Grenzschicht	1	1
m3	Licht wird gebrochen bei Durchqueren	da	Stoff 2 ist optisch dichter als Stoff 1	1	1
m4	Licht bewegt sich zu optisch dünneres Material	von	optisch dichteres Material	1	1
m5	Licht bewegt sich zu optisch dünneres Material von optisch dichteres Material	dadurch	Licht wird weggebrochen von Lot	1	1
m6	Durchqueren hat Ort	(von)	Lichtstrahl	1	1
m7	imaginäre Linie befindet sich orthogonal zu Oberfläche	an	Ort	1	1
m8	Licht wird weggebrochen von Lot	somit	Ausfallswinkel ist größer als Einfallswinkel	1	1
m9	Licht wird weggebrochen von Lot somit Ausfallswinkel ist größer als Einfallswinkel	deshalb	Münze wirkt an anderer Ort	0	0

b02-A

Kodierung der Elemente für b02-A

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Brechung	3	3	
2	Laserstrahl	2	2	
3	Übergang	3	3	
4	Luft	2	2	
5	Wasser	2	2	
6	Ausbreitungsgeschwindigkeit	3	3	Lichtgeschwindigkeit
7	Licht	3	3	
8	verschiedene Medien	3	2	Medien, jeweiliges Medium
9	Ausbreitung	3	3	
10	Huygens'sche Elementarwellen	3	3	
11	Frequenz	3	3	
12	Abstand	3	3	
13	Wellenberge	3	3	
14	Ausbreitungsrichtung	3	3	
15	einhüllende Wellenfronten	3	3	
16	beobachtete Brechung	2	0	
17	Brechungsgesetz	3	3	
18	geometrische Überlegungen	3	3	
19	Brechzahl (1)	3	3	
20	Brechzahl (2)	3	3	
21	Beobachter	0	2	
22	Medium	0	2	

$$x_{b02-A} = 0,6$$

Kodierung der Beziehungen für bo2-A

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C ₂	ID	S	Label	T	C ₁
e1	1	lässt sich zurückführen auf	6	e1	e1	1	lässt sich zurückführen auf	6	e1
e2	7	hat	6	e4	e2	2	hat (...) bei (...)	1 / 3	m3
e3	2	erfährt	1	e2	e3	4 / 5	haben	3	-
e4	3	(ist) in	5	e3	e4	7	hat (...) in (...)	6 / 8	-
e5	7	breitet sich aus in	5	-	e5	7	breitet sich langsamer aus in (...) als in (...)	5 / 4	m4
e6	7	breitet sich aus in	4	-	e6	7	hat	9	e7
e7	7	erfährt	9	e6	e7	9	kann sich vorgestellt werden mit	10	e8
e8	9	stellt man sich vor mit Hilfe von	10	e7	e8	12	ist geringer in (...) als in (...) bei gleicher (...)	5 / 4 / 11	-
e9	12	ist zwischen	13	e9	e9	12	ist zwischen den einzelnen	13	e9
e10	14	erhält man, wenn man verbindet	15	e10	e10	14	wird erhalten durch Verbinden von	15	e10
e11	14	ändert sich bei	3	e11	e11	14	ändert sich bei	3	e11
e12	1	kann quantitativ beschrieben werden durch	17	e12	e12	1	kann quantitativ beschrieben werden durch	17	e12
e13	1	kann abgeleitet werden aus	18	e13	e13	1	kann abgeleitet werden aus	18	e13
e14	8	haben ... (und) ...	19, 20	e14	e14	8	haben	19/20	e14
e15	6	geht ein in ... (und) ...	19, 20	e15	e15	6	geht explizit ein in (...) und (...)	19/20	e15
m1	e2	in	8	e4	e16	6	ist in	8	m5
m2	e4	von	4	e3	m1	e7	so	e8	m9
m3	e3	bei	m2	e2	m2	e11	entspricht	1	m11
m4	e5	langsamer als	e6	e5	m3	e10	so	e11	m10
m5	e9	in	5	-					
m6	e9	in	4	-					
m7	m5	geringer als	m6	e8					
m8	m7	bei gleicher	11	e8					
m9	e8	dann	m8	m1					
m10	e10	dann	e11	m2					
m11	m10	entspricht beobachteter	1	-					
$n(c1 \in C2)_{b02-A} = 21/26$					$n(c2 \in C1)_{b02-A} = 16/19$				

Kodierung der fachlichen Korrektheit für bo2-A

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C ₁	C ₂
e1	Brechung	lässt sich zurückführen auf	Ausbreitungsgeschwindigkeit	1	1
e2	Licht	hat	Ausbreitungsgeschwindigkeit	1	1
e3	Laserstrahl	erfährt	Brechung	1	1
e4	Übergang	(ist) in	Wasser	1	1
e5	Licht	breitet sich aus in	Wasser	1	1
e6	Licht	breitet sich aus in	Luft	1	1
e7	Licht	erfährt	Ausbreitung	1	1
e8	Ausbreitung	stellt man sich vor mit Hilfe von	Huygens'sche Elementarwellen	1	1
e9	Abstand	ist zwischen	Wellenberge	1	1
e10	Ausbreitungsrichtung	erhält man, wenn man verbindet	einfallende Wellenfronten	0	1
e11	Ausbreitungsrichtung	ändert sich bei	Übergang	1	1
e12	Brechung	kann quantitativ beschrieben werden durch	Brechungsgesetz	1	1
e13	Brechung	kann abgeleitet werden aus	geometrische Überlegungen	1	1
e14	verschiedene Medien	haben ... (und) ...	Brechzahl (1), Brechzahl (2)	1	1
e15	Ausbreitungsgeschwindigkeit	geht ein in ... (und) ...	Brechzahl (1), Brechzahl (2)	1	1
m1	Licht hat Ausbreitungsgeschwindigkeit	in	verschiedene Medien	1	1
m2	Übergang (ist) in Wasser	von	Luft	1	1
m3	Laserstrahl erfährt Brechung	bei	Übergang (ist) in Wasser von Luft	1	1
m4	Licht breitet sich aus in Wasser	langsamer als	Licht breitet sich aus in Luft	1	1
m5	Abstand ist zwischen Wellenberge	(gibt es) in	Wasser	1	1
m6	Abstand ist zwischen Wellenberge	(gibt es) in	Luft	1	1
m7	Abstand ist zwischen Wellenberge in Wasser	(ist) geringer als	Abstand ist zwischen Wellenberge in Luft	1	1
m8	Abstand ist zwischen Wellenberge in Wasser	bei gleicher	Frequenz	1	1
	geringer als Abstand ist zwischen Wellenberge in Luft				
m9	Ausbreitung stellt man sich vor mit Hilfe von Huygens'sche Elementarwellen	dann	Abstand ist zwischen Wellenberge in Wasser geringer als Abstand ist zwischen Wellenberge in Luft bei gleicher Frequenz	1	1
m10	Ausbreitungsrichtung erhält man, wenn man verbindet einfallende Wellenfronten	dann	Ausbreitungsrichtung ändert sich bei Übergang	0	1
m11	Ausbreitungsrichtung erhält man, wenn man verbindet einfallende Wellenfronten dann Ausbreitungsrichtung ändert sich bei Übergang	entspricht beobachteter	Brechung	0	1

bo2-C

Kodierung der Elemente für bo2-C

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Phänomen	2	3	
2	Brechung	3	3	
3	Lichtstrahlen (1)	3	3	(von Stift in linker Box)
4	Stift (links)	2	2	
5	linke Box	2	2	
6	direkter Weg	3	3	
7	Beobachter	2	2	
8	Übergang	3	3	
9	Medien	3	0	
10	Stift (rechts)	2	2	
11	Lichtstrahlen (2)	3	3	(vom Stift im Wasser)
12	Wasser	2	2	
13	Luft	2	2	
14	Winkel	3	3	
15	Ursprung	3	2	
16	(falsche) Position	2	2	
17	Eindruck	2	2	
18	Knick	2	2	
19	rechte Box	2	2	
$\kappa_{bo2-C} = 0,69$				

Kodierung der Beziehungen für bo2-C

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C2	ID	S	Label	T	C1
e1	1	lässt sich erklären durch	2	e1	e1	1	lässt sich erklären durch	2	e1
e2	3	gehen aus von	4	e2	e2	3	gehen aus von	4	e2
e3	4	ist in	5	e3	e3	4	ist in	5	e3
e4	3	bewegen sich zu	7	e4	e4	3	bewegen sich auf (...) zu (...)	6 / 7	-
e5	8	liegt nicht vor zwischen	9	e5	e5	9	hat kein	8	e5
e6	11	gehen aus von	10	e6	e6	11	gehen aus von	10	e6
e7	10	ist in	12	e7	e7	10	ist in	12	e7
e8	11	werden gebrochen bei	8	e8	e8	11	werden dagegen gebrochen bei	8	e8
e9	8	findet statt in (zu)	13	-	e9	12 / 13	haben	8	-
e10	11	treffen	7	e10	e10	11	treffen	7	e10
e11	7	nimmt wahr	11	e11	e11	7	nimmt (...) wahr mit (...)	11 / 14	-
e12	14	(ist) nach	2	e12	e12	14	entsteht nach	2	e12
e13	7	konstruiert	15	e13	e13	7	konstruiert (...) an (...)	15 / 16	-
e14	11	haben	15	e14	e14	11	haben	15	e14
e15	18	(erscheint in)	10	e15	e15	17	entsteht	17	-
e16	18	ist	17	-	e16	10	hat	18	e15
e17	19	(erscheint) flacher als	5	e17	e17	19	ist flacher als	5	e17
m1	e4	auf	6	e4	m1	e4	da	e5	m2
m2	m1	da	e5	m1	m2	e8	anschließend	e10	m9
m3	e9	von	12	-	m3	e12	nach	2	e12
m4	e11	mit	e12	e11	m4	e11	somit	e13	-
m5	e13	an	16	e13	m5	17	ist (...) bzw. (...)	e16 / e17	-
m6	e17	(ist)	17	m5	m6	m4	somit	17	-
m7	m5	somit	e15	-					
m8	m5	somit	e17	-					
m9	e8	anschließend	e10	m2					
$n(c1 \in C2)_{bo2-C} = 21/26$					$n(c2 \in C1)_{bo2-C} = 15/23$				

Kodierung der fachlichen Korrektheit für bo2-C

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
e1	Phänomen	lässt sich erklären durch	Brechung	1	1
e2	Lichtstrahlen (1)	gehen aus von	Stift (links)	1	1
e3	Stift (links)	ist in	linke Box	1	1
e4	Lichtstrahlen (1)	bewegen sich zu	Beobachter	0	0
e5	Übergang	liegt (links) nicht vor zwischen	Medien	1	1
e6	Lichtstrahlen (2)	gehen aus von	Stift (rechts)	1	1
e7	Stift (rechts)	ist in	Wasser	1	1
e8	Lichtstrahlen (2)	werden gebrochen bei	Übergang	1	1
e9	Übergang	findet statt in (zu)	Luft	1	1
e10	Lichtstrahlen (2)	treffen	Beobachter	1	1
e11	Beobachter	nimmt wahr	Lichtstrahlen (2)	1	1
e12	Winkel	(ist) nach	Brechung	1	1
e13	Beobachter	konstruiert	Ursprung	1	1
e14	Lichtstrahlen (2)	haben	Ursprung	1	1
e15	Knick	(erscheint in)	Stift (rechts)	1	1
e16	Knick	ist	Eindruck	1	1
e17	rechte Box	(erscheint) flacher als	linke Box	1	1
m1	Lichtstrahlen (1) bewegen sich zu Beobachter	auf	direkter Weg	0	1
m2	Lichtstrahlen (1) bewegen sich zu Beobachter auf direkter Weg	da	Übergang liegt (links) nicht vor zwischen Medien	0	1
m3	Übergang findet statt in (zu) Luft	von	Wasser	1	1
m4	Beobachter nimmt wahr Lichtstrahlen (2)	mit	Winkel (ist) nach Brechung	1	1
m5	Beobachter konstruiert Ursprung	an	(falsche) Position	1	1
m6	rechte Box (erscheint) flacher als linke Box	(ist)	Eindruck	1	1
m7	Beobachter konstruiert Ursprung an (falsche) Position	somit	Knick (erscheint in) Stift (rechts)	1	1
m8	Beobachter konstruiert Ursprung an (falsche) Position	somit	rechte Box (erscheint) flacher als linke Box	1	1
m9	Lichtstrahlen (2) werden gebrochen bei Übergang	anschließend	Lichtstrahlen (2) treffen Beobachter	1	1

co3-B

Kodierung der Elemente für co3-B

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Kiste (1)	2	2	linke Kiste
2	Kiste (2)	2	2	
3	Münze (1)	2	2	Erste
4	Münze (2)	2	2	zweite Münze
5	Mittelpunkt (1)	2	2	Punkt (1)
6	Mittelpunkt (2)	2	2	Punkt (2)
7	Wasser	2	2	
8	Phänomen	2	3	
9	Brechung	3	3	
10	Licht	3	3	
11	Brechungsindex n	3	3	(von Wasser)
12	Luft	2	2	
13	Wahrnehmung	2	2	
14	anderer Punkt	2	2	
15	Brechungsindex (Luft)	0	3	
$\kappa_{co3-B} = 0,7$				

Kodierung der Beziehungen für c03-B

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C2	ID	S	Label	T	C1
e1	1	ist zu sehen	1	-	e1	1	hat	3	-
e2	2	ist zu sehen	2	-	e2	2	hat	4	-
e3	1	(hat)	5	-	e3	3	ist in	5	e5
e4	2	(hat)	6	-	e4	4	ist in	6	e6
e5	3	(ist) in	5	e3	e5	5	ist gleich zu	6	e7
e6	4	(ist) in	6	e4	e6	3 / 4	liegen am selben	5 / 6	-
e7	5	(ist) derselbe (wie)	6	e5	e7	1	hat	3	e9
e8	1	(hat nicht)	7	e8	e8	1	ist ohne	7	e8
e9	1	(ist) mit / (hat)	3	e7	e9	3	scheint aber weiter vorn zu liegen	3	e10
e10	3	scheint weiter vorn zu liegen	3	e9	e10	4	hat	2	e11
e11	4	(ist) in	2	e10	e11	2	ist gefüllt mit	7	e12
e12	2	(hat)	7	e11	e12	4	scheint sich weiter hinten zu befinden	4	e13
e13	4	befindet sich scheinbar weiter hinten	4	e12	e13	10	hat	9	e14
e14	10	(erfährt)	9	e13	e14	8	hängt zusammen mit	10	e15
e15	8	hängt zusammen mit	9	e14	e15	8	hängt zusammen mit (...) und (...)	11 / 15	e16
e16	8	hängt zusammen mit ... (und) ...	11, 15	e15	e16	7	hat	11	e17
e17	7	hat	11	e16	e17	12	hat	15	e18
e18	12	hat	15	e17	e18	11	ist höher als	15	e19
e19	11	ist höher als	15	e18	e19	10	wird anders gebrochen	10	e20
e20	10	wird anders gebrochen	10	e19	e20	4	erscheint in	13	m5
e21	4	erscheint an	14	e21	e21	4	erscheint an (...) als (...)	14 / 3	-
m1	e10	während	e13	m1	m1	e9	während	e12	m1
m2	m1	ist	8	m2	m2	m1	ist	8	m2
m3	e20	da	e19	m4	m3	e21	ist	13	m5
m4	e21	als	3	e21	m4	e19 / m3	da	e18	-
m5	m4	in	13	-	m5				
$n(c1 \in C2)_{c03-B} = 20/26$					$n(c2 \in C1)_{c03-B} = 16/23$				

Kodierung der fachlichen Korrektheit für c03-B

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
e1	Kiste (1)	ist zu sehen	Kiste (1)	1	1
e2	Kiste (2)	ist zu sehen	Kiste (2)	1	1
e3	Kiste (1)	(hat)	Mittelpunkt (1)	1	1
e4	Kiste (2)	(hat)	Mittelpunkt (2)	1	1
e5	Münze (1)	(ist) in	Mittelpunkt (1)	1	1
e6	Münze (2)	(ist) in	Mittelpunkt (2)	1	1
e7	Mittelpunkt (1)	(ist) derselbe (wie)	Mittelpunkt (2)	1	1
e8	Kiste (1)	(hat nicht)	Wasser	1	1
e9	Kiste (1)	(ist) mit / (hat)	Münze (1)	1	1
e10	Münze (1)	scheint weiter vorn zu liegen	Münze (1)	1	1
e11	Münze (2)	(ist) in	Kiste (2)	1	1
e12	Kiste (2)	(hat)	Wasser	1	1
e13	Münze (2)	befindet sich scheinbar weiter hinten	Münze (2)	1	1
e14	Licht	(erfährt)	Brechung	1	1
e15	Phänomen	hängt zusammen mit	Brechung	1	1
e16	Phänomen	hängt zusammen mit ... (und) ...	Brechungsindex n, Brechungsindex (Luft)	1	1
e17	Wasser	hat	Brechungsindex n	1	1
e18	Luft	hat	Brechungsindex (Luft)	1	1
e19	Brechungsindex n	ist höher als	Brechungsindex (Luft)	1	1
e20	Licht	wird anders gebrochen	Licht	0	0
e21	Münze (2)	erscheint an	anderer Punkt	1	1
m1	Münze (1) scheint weiter vorn zu liegen	während	Münze (2) befindet sich scheinbar weiter hinten	1	1
m2	Münze (1) scheint weiter vorn zu liegen während	ist	Phänomen	1	1
m3	Münze (2) befindet sich scheinbar weiter hinten				
m3	Licht wird anders gebrochen	da	Brechungsindex n ist höher als Brechungsindex (Luft)	0	0
m4	Münze (2) erscheint an anderer Punkt	als	Münze (1)	1	1
m5	Münze (2) erscheint an anderer Punkt als Münze (1)	in	Wahrnehmung	1	1

do2-A

Kodierung der Elemente für do2-A

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Verlauf	2	2	Strahl
2	Lichtstrahl	3	3	
3	Laser	2	2	
4	Eindringen	2	2	
5	Medium	2	2	
6	Wasser	2	2	
7	Ausbreitungsrichtung	3	3	
8	Phänomen	2	3	
9	(Licht-)Brechung	3	3	
10	Modell	3	3	
11	Teilchen	4	3	
12	Welle	3	3	
13	einfachste Methode	3	3	
14	Rahmen der geometrischen Optik	3	3	
15	Ausbreitung	3	3	(in Medium 1) (in Medium 2)
16	Licht	3	3	
17	Fermat'sches Prinzip	3	3	
18	zeitlich kürzester Weg	3	3	
19	Geschwindigkeit (1)	3	3	
20	Geschwindigkeit (2)	3	3	
21	Dispersionsgleichung	3	3	
22	Luft	2	2	
23	gerade Strecke	3	3	
24	Punkt A	3	3	
25	Punkt B	3	3	
26	kürzeste Zeit	3	3	
27	Grad	3	2	Gesetz
28	Biegung	3	2	
29	Snellius Brechungsgesetz	3	3	
30	Herleitung	3	3	
31	Wellenbild	3	3	
32	Elektrodynamik	3	3	
33	Strahl	0	3	
34	Geschwindigkeiten (allgemein)	0	3	
35	Medien	3	3	
$\kappa_{d02-A} = 0,57$				

Kodierung der Beziehungen für do2-A

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C ₁	ID	S	Label	T	C ₁
e1	2	hat	1	e3	e1	1	ist zu erkennen	1	e3
e2	3	hat (/ ist)	2	e2	e2	3	hat	2	e2
e3	1	ist zu erkennen	1	e1	e3	2	hat	1	e1
e4	3	ändert seine	7	e4	e4	3	ändert	7	e4
e5	5	(ist) in diesem Fall	6	e6	e5	3	hat	7	e4
e6	8	nennt man	9	e7	e6	5	ist hier	6	e5
e7	10	gibt es für	16	e8	e7	8	nennt man	9	e6
e8	11,12,2	sind verschiedene	10	e9	e8	10	existiert für	16	e7
e9	8	kann beschrieben werden mit	10	-	e9	11,2,12	(...), (...) und (...) sind verschiedene	10	e8
e10	13	ist	14	e10	e10	13	ist zu beschreiben im	14	e10
e11	16	(hat / vollzieht)	15	e12	e11	16	breitet sich nach (...) aus	17	e12
e12	16	breitet sich aus nach	17	e11	e12	16	hat	15	e11
e13	16	nimmt	18	e13	e13	16	nimmt	18	e13
e14	16	biegt ab	16	e14	e14	16	biegt ab	16	e14
e15	16	bewegt sich mit unterschiedlichen	19, 20	m9	e15	16	bewegt sich in verschiedenen	35	m16
e16	19, 20	kann bestimmt werden durch	21	e16	e16	19 / 20	(...) und (...) können bestimmt werden durch	21	e16
e17	16	hat	19, 20	e17	e17	16	hat andere	19 / 20	e17
e18	23	ist nicht mehr	18	e18	e18	23	ist nicht mehr	18	e18
e19	16	gelangt zu	25	e19	e19	16	gelangt zu	25	e19
e20	16	muss abbiegen	16	e20	e20	16	muss zwischen durch abbiegen	16	e20
e21	28	hat	27	e22	e21	27	kann berechnet werden durch	29	e22
e22	27	kann berechnet werden durch	29	e21	e22	28	hat	27	e21
e23	29	hat	30	e24	e23	30	wird abgeleitet aus	31	e24
e24	30	wird abgeleitet aus	31	e23	e24	29	hat	30	e23
e25	30	kann bewiesen werden in	32	e26	e25	16	hat	31	m14
m1	e4	bei	4	m1	e26	30	kann bewiesen werden in	32	e25
m2	m1	in	5	m2	m1	e4	bei	4	m1
m3	m2	ist	8	m3	m2	m1	in	5	m2
m4	e8	um zu beschreiben	8	-	m3	m2	ist	8	m3
m5	m17	also als	2	-	m4	13	für	8	m17
m6	m5	hierbei	m16	m7	m5	e10	also als	2	m5
m7	e12	heißt	e13	-	m6	e11	gilt für	15	m15
m8	e17	in	6	m10	m7	m5	hierbei	m6	m6
m9	m8	anders als in	22	m11	m8	17	heißt	e13	m7
m10	m9	daher	e18	m13	m9	e15	mit unterschiedlichen (...) und (...)	19 / 20	-
m11	m10	wie (/anders als) in	5	-	m10	e17	in	6	m8
m12	e19	von	24	m14	m11	m10	als in	22	m9
m13	m12	in	26	m15	m12	e18	wie in	5	m11
m14	e24	für	16	-	m13	e18	da	m11	m10
m15	e12	gilt für	15	m7	m14	e19	von	24	m12
m16	e15	in verschiedenen	35	-	m15	m14	in	26	m13
m17	e10	um zu beschreiben	8	-	m16	e20	um dennoch	e19	-
$n(c1 \in C2)_{d02-A} = 34/42$					$n(c2 \in C1)_{d02-A} = 40/42$				

Kodierung der fachlichen Korrektheit für doz-A

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
e1	Lichtstrahl	hat	Verlauf	1	1
e2	Laser	hat (/ ist)	Lichtstrahl	0	1
e3	Verlauf	ist zu erkennen	Verlauf	1	1
e4	Laser	ändert seine	Ausbreitungsrichtung	1	1
e5	Medium	(ist) in diesem Fall	Wasser	1	1
e6	Phänomen	nennt man	(Licht-)Brechung	1	1
e7	Modell	gibt es für	Licht	1	1
e8	Lichtstrahl, Teilchen, Welle	sind verschiedene	Modell	1	1
e9	Phänomen	kann beschrieben werden mit	Modell	1	1
e10	einfachste Methode	ist	Rahmen der geometrischen Optik	1	1
e11	Licht	(hat / vollzieht)	Ausbreitung	1	1
e12	Licht	breitet sich aus nach	Fermat'sches Prinzip	1	1
e13	Licht	nimmt	zeitlich kürzester Weg	1	1
e14	Licht	biegt ab	Licht	1	0
e15	Licht	bewegt sich mit unterschiedlichen	Geschwindigkeit (i)	1	1
e16	Geschwindigkeit (i)	kann bestimmt werden durch	Dispersionsgleichung	1	1
e17	Licht	hat	Geschwindigkeit (i)	1	1
e18	gerade Strecke	ist nicht mehr	zeitlich kürzester Weg	1	1
e19	Licht	gelangt zu	Punkt B	1	1
e20	Licht	muss abbiegen	Licht	1	0
e21	Biegung	hat	Grad	1	1
e22	Grad	kann berechnet werden durch	Snellius Brechungsgesetz	1	1
e23	Snellius Brechungsgesetz	hat	Herleitung	1	1
e24	Herleitung	wird abgeleitet aus	Wellenbild	1	1
e25	Herleitung	kann bewiesen werden in	Elektrodynamik	0	1
m1	Laser ändert seine Ausbreitungsrichtung	bei	Eindringen	1	1
m2	Laser ändert seine Ausbreitungsrichtung bei Eindringen	in	Medium	1	1
m3	Laser ändert seine Ausbreitungsrichtung bei Eindringen in Medium	ist	Phänomen	1	1
m4	Lichtstrahl, Teilchen, Welle sind verschiedene	um zu beschreiben	Phänomen	1	1
m5	einfachste Methode ist Rahmen der geometrischen Optik um zu beschreiben Phänomen	also als	Lichtstrahl	1	1
m6	einfachste Methode ist Rahmen der geometrischen Optik um zu beschreiben Phänomen also als Lichtstrahl	hierbei	Licht bewegt sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeit (i) in verschiedenen Medien	1	1
m7	Licht breitet sich aus nach Fermat'sches Prinzip	heißt	Licht nimmt zeitlich kürzester Weg	1	1
m8	Licht hat Geschwindigkeit (i)	in	Wasser	1	1
m9	Licht hat Geschwindigkeit (i) in Wasser	(ist) anders als in	Luft	1	1
m10	Licht hat Geschwindigkeit (i) in Wasser (ist) anders als in Luft	daher	gerade Strecke ist nicht mehr zeitlich kürzester Weg	1	1
m11	Licht hat Geschwindigkeit (i) in Wasser (ist) anders als in Luft daher gerade Strecke ist nicht mehr zeitlich kürzester Weg	wie (/anders als) in	Medium	1	1
m12	Licht gelangt zu Punkt B	von	Punkt A	1	1
m13	Licht gelangt zu Punkt B von Punkt A	in	kürzeste Zeit	1	1
m14	Herleitung wird abgeleitet aus Wellenbild	für	Licht	1	1
m15	Licht breitet sich aus nach Fermat'sches Prinzip	gilt für	Ausbreitung	1	1
m16	Licht bewegt sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeit (i)	in verschiedenen	Medien	1	1
m17	einfachste Methode ist Rahmen der geometrischen Optik	um zu beschreiben	Phänomen	1	1
m18	Licht muss abbiegen	damit	Licht gelangt zu Punkt B	1	0

e01-C

Kodierung der Elemente für e01-C

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Bleistift	2	2	
2	reflektiertes Licht	3	3	
3	Übergang	3	3	
4	optisch dichteres Medium	3	3	Medium
5	optisch dünneres Medium	3	3	dünneres Medium
6	Dielektrizitätskonstante	3	3	
7	Richtung	3	3	
8	Lichtstrahl	3	3	
9	Lot	3	3	
10	Punkt	2	2	
11	Gerade	2	3	
12	Betrachter	2	2	
13	Brechung	3	3	
14	Stetigkeitsbedingungen	4	3	
15	elektromagnetische Felder	4	3	
16	Licht	3	0	(Licht allg.)
17	klassische Physik	3	3	
18	Grenzfläche	3	3	
19	Folgerung	4	3	
20	Maxwellgleichungen	4	3	
21	Eigenschaften	4	3	
$n_{e01-C} = 0,35$				

Kodierung der Beziehungen für e01-C

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C ₂	ID	S	Label	T	C ₁
e1	2	wird reflektiert von	1	-	e1	2	wird gebrochen zu	5	e2
e2	2	wird gebrochen zu	5	e1	e2	2	kommt von	1	e1
e3	4	hat höhere	6	e3	e3	4	bedeutet höhere	6	e3
e4	8	hat	7	e6	e4	4	hat	6	-
e5	7	wird verändert	7	e5	e5	7	wird verändert	7	e5
e6	8	wird weggebrochen von	9	m4	e6	8	hat	7	e4
e7	1	hat	10	e9	e7	5	Vom (...) wird gebrochen zum	4	m5
e8	10	erscheint weiter oben	10	e8	e8	10	muss weiter oben erscheinen	10	e8
e9	10	ist zu erwarten in	11	e10	e9	1	hat	10	e7
e10	1	erscheint nach oben geknickt	1	e11	e10	10	ist zu erwarten in	11	e9
e11	13	findet statt aufgrund	14	e12	e11	1	erscheint nach oben geknickt	1	e10
e12	16	ist	15	e13	e12	13	findet statt aufgrund von	14	e11
e13	14	(gelten) an	18	m10	e13	16	ist	15	e12
e14	14	sind direkte	19	e14	e14	14	sind direkte	19	e14
e15	20	beschreiben	21	e15	e15	20	beschreiben	21	e15
e16	15	haben	21	e16	e16	15	haben	21	e16
m1	e2	von	4	m1	m1	e1	von	4	m1
m2	e2	bei	3	m2	m2	m1	bei	3	m2
m3	e2	heißt	e5	m3	m3	e1	heißt	e5	m3
m4	e6	von	5	-	m4	e7	weg von	9	-
m5	e6	zu	4	-	m5	e10	zu	12	m7
m6	e6	daher	e8	m7	m6	e8	als	m5	-
m7	e9	zu	12	m5	m7	m6	da	m4	-
m8	e8	als	e9	m6	m8	m7	daher	e11	-
m9	m8	daher	e10	m8	m9	e12	für	15	m10
m10	e11	für	15	m9	m10	e14	an	18	-
m11	e12	in	17	m11	m11	e13	in	17	m11
m12	e14	aus	20	m12	m12	e14	aus	20	m12
m13	e15	in	17	m13	m13	e15	in	17	m13
					m14	m10	da	m11	-
$n(c1 \in C2)_{e01-C} = 26/29$					$n(c2 \in C1)_{e01-C} = 23/30$				

Kodierung der fachlichen Korrektheit für e01-C

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
e1	reflektiertes Licht	wird reflektiert von	Bleistift	1	1
e2	reflektiertes Licht	wird gebrochen zu	optisch dünneres Medium	1	1
e3	optisch dichteres Medium	hat höhere	Dielektrizitätskonstante	1	1
e4	Lichtstrahl	hat	Richtung	1	1
e5	Richtung	wird verändert	Richtung	1	1
e6	Lichtstrahl	wird weggebrochen von	Lot	1	1
e7	Bleistift	hat	Punkt	1	1
e8	Punkt	erscheint weiter oben	Punkt	1	1
e9	Punkt	ist zu erwarten in	Gerade	1	1
e10	Bleistift	erscheint nach oben geknickt	Bleistift	1	1
e11	Brechung	findet statt aufgrund	Stetigkeitsbedingungen	1	1
e12	Licht	ist	elektromagnetische Felder	1	1
e13	Stetigkeitsbedingungen	(gelten) an	Grenzfläche	1	1
e14	Stetigkeitsbedingungen	sind direkte	Folgerung	1	1
e15	Maxwellgleichungen	beschreiben	Eigenschaften	1	1
e16	elektromagnetische Felder	haben	Eigenschaften	1	1
m1	reflektiertes Licht wird gebrochen zu optisch dünneres Medium	von	optisch dichteres Medium	1	1
m2	reflektiertes Licht wird gebrochen zu optisch dünneres Medium	bei	Übergang	1	1
m3	reflektiertes Licht wird gebrochen zu optisch dünneres Medium	heißt	Richtung wird verändert	1	1
m4	Lichtstrahl wird weggebrochen von Lot	von	optisch dünneres Medium	0	0
m5	Lichtstrahl wird weggebrochen von Lot	zu	optisch dichteres Medium	0	0
m6	Lichtstrahl wird weggebrochen von Lot	daher	Punkt erscheint weiter oben Punkt	1	0
m7	Punkt ist zu erwarten in Gerade	zu	Betrachter	1	1
m8	Punkt erscheint weiter oben	als	Punkt ist zu erwarten in Gerade	1	1
m9	Punkt erscheint weiter oben als Punkt ist zu erwarten in Gerade	daher	Bleistift erscheint nach oben geknickt	1	1
m10	Brechung findet statt aufgrund Stetigkeitsbedingungen	für	elektromagnetische Felder	1	1
m11	Licht ist elektromagnetische Felder	in	klassische Physik	1	1
m12	Stetigkeitsbedingungen sind direkte Folgerung	aus	Maxwellgleichungen	1	1
m13	Maxwellgleichungen beschreiben Eigenschaften	in	klassische Physik	1	1

e02-C

Kodierung der Elemente für e02-C

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Stift	2	2	
2	Luft	2	2	
3	Wasser	2	2	
4	Knick	2	2	
5	Beobachter	2	2	
6	Lichtwellen	3	3	
7	Medium 1	2	0	
8	Medium 2	2	0	
9	Brechungsindex (1)	3	3	
10	Brechungsindex (2)	3	3	
11	Geschwindigkeit (1)	3	3	
12	Geschwindigkeit (2)	3	3	
13	Licht	3	3	
14	Linse	1	1	
15	Brechungsindex (3)	4	4	
16	Bild	4	4	
17	Stift (2)	2	2	(nur in Luft)
$\kappa_{e02-C} = 0,83$				

Kodierung der Beziehungen für e02-C

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C ₁	ID	S	Label	T	C ₁
e1	1	ist zu sehen	1	-	e1	1	ist halb in	2	e2
e2	1	ist halb in ... (und) ...	2, 3	-	e2	1	ist halb in	3	e2
e3	1	ist vermeintlich abgeknickt	1	e3	e3	1	knickt vermeintlich ab	1	e3
e4	17	ist nur in	2	e4	e4	17	ist nur in	2	e4
e5	17	besitzt keinen	4	e5	e5	17	besitzt keinen	4	e5
e6	5	nimmt wahr	6	e6	e6	5	nimmt wahr	6	e6
e7	6	werden reflektiert von	1	e7	e7	6	werden reflektiert von	1	e7
e8	6	besitzen ... (und) ...	9, 10	e8	e8	6	besitzen (...) und (...)	9 / 10	e8
e10	7	(ist) hier	2	e9	e9	7	ist	2	e9
e11	8	(ist) hier	3	e10	e10	8	ist	3	e10
e12	9	(ist) anders (als)	10	-	e11	9	resultiert aus	11	e16
e13	13	hat	11	e13	e12	10	resultiert aus	12	e17
e14	13	hat	12	e14	e13	13	hat	11	e13
e15	11	(ist) unterschiedlich (zu)	12	-	e14	13	hat	12	e14
e16	9	resultiert aus	11	e11	e15	14	besitzt	15	e18
e17	10	resultiert aus	12	e12	e16	16	wird verzerrt	16	e19
e18	14	besitzt ebenfalls	15	e15	e17	3	In (...) herausgestellt durch	4	m6
e19	16	ist verzerrt	16	e16	m1	e3	wohingegen	e5	m8
m1	e8	in ... (und) ...	7, 8	m2	m2	e8	in (...) und (...)	7 / 8	m1
m2	e13	in	7	m3	m3	e13	in	7	m2
m3	e14	in	8	m4	m4	e14	in	8	m3
m4	14	ist ähnlich zu	e12	-	m5	m 2	ähnlich zu	14	-
m5	e19	stellt sich heraus als	4	-	m6	m 2	ebenfalls	e15	e18
m6	m5	in	3	-	m7	e15	dadurch	e16	m7
m7	e15	dadurch	m5	-	m8	m7	hier	e17	m6
m8	e3	wohingegen	e5	m1					
$n(c1 \in C2)_{e02-C} = 18/26$					$n(c2 \in C1)_{e02-C} = 24/25$				

Kodierung der fachlichen Korrektheit für e02-C

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C ₁	C ₂
e1	Stift (1)	ist zu sehen	Stift (1)	1	1
e2	Stift (1)	ist halb in ... (und) ...	Luft, Wasser	1	1
e3	Stift (1)	ist vermeintlich abgeknickt	Stift (1)	1	1
e4	Stift (2)	ist nur in	Luft	1	1
e5	Stift (2)	besitzt keinen	Knick	1	1
e6	Beobachter	nimmt wahr	Lichtwellen	0	0
e7	Lichtwellen	werden reflektiert von	Stift (1)	1	1
e8	Lichtwellen	besitzen ... (und) ...	Brechungsindex (1), Brechungsindex (2)	0	1
e10	Medium 1	(ist) hier	Luft	1	1
e11	Medium 2	(ist) hier	Wasser	1	1
e12	Brechungsindex (1)	(ist) anders (als)	Brechungsindex (2)	1	1
e13	Licht	hat	Geschwindigkeit (1)	1	1
e14	Licht	hat	Geschwindigkeit (2)	1	1
e15	Geschwindigkeit (1)	(ist) unterschiedlich (zu)	Geschwindigkeit (2)	1	1
e16	Brechungsindex (1)	resultiert aus	Geschwindigkeit (1)	1	1
e17	Brechungsindex (2)	resultiert aus	Geschwindigkeit (2)	1	1
e18	Linse	besitzt ebenfalls	Brechungsindex (3)	1	1
e19	Bild	ist verzerrt	Bild	1	1
m1	Lichtwellen besitzen ... (und) ... Brechungsindex (1), Brechungsindex (2)	in ... (und) ...	Medium 1, Medium 2	1	1
m2	Licht hat Geschwindigkeit (1)	in	Medium 1	1	1
m3	Licht hat Geschwindigkeit (2)	in	Medium 2	1	1
m4	Linse	kennt man ähnlich zu	Brechungsindex (1) (ist) anders (als) Brechungsindex (2)	1	1
m5	Bild ist verzerrt	stellt sich heraus als	Knick	0	1
m6	Bild ist verzerrt stellt sich heraus als Knick	in	Wasser	0	1
m7	Geschwindigkeit (1) (ist) unterschiedlich (zu) Geschwindigkeit (2)	dadurch	Bild ist verzerrt stellt sich heraus als Knick	0	1
m8	Stift ist vermeintlich abgeknickt	wohingegen	Stift besitzt keinen Knick	1	1

foi-B

Kodierung der Elemente für foi-B

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Licht	3	3	
2	versch. Medien	2	2	
3	optischer Weg	3	3	Weg
4	Produkt	3	3	
5	Brechungsindex	3	3	(allg.)
6	zurückgelegter Weg	3	3	
7	kürzester optischer Weg	3	3	
8	Beobachter	2	2	menschl. Auge
9	(spezieller) Lichtstrahl	3	3	
10	Medium	2	2	
11	kleinerer Brechungsindex	3	3	(von Luft)
12	Münze	2	2	
13	Wasser	2	2	
14	Vergleich	2	2	
15	leeres Becken	3	3	
16	höherer Brechungsindex	3	3	(von Wasser)
17	Luft	2	2	
18	Wasseroberfläche	2	2	
19	Bild	3	3	
20	Verlauf	3	3	
21	Brechungsindex (2)	0	3	(von Wasser)
$\kappa_{f01-B} = 0,9$				

Kodierung der Beziehungen für fo1-B

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C ₁	ID	S	Label	T	C ₁
e1	1	breitet sich unterschiedlich aus in	2	e1	e1	1	breitet sich unterschiedlich aus in	2	e1
e2	3	ergibt sich aus	4	e2	e2	3	gilt zu betrachten	3	m1
e3	5,6	... (und) ... haben	4	e4	e3	3	ergibt sich aus	4	e2
e4	1	sucht sich immer	7	e5	e4	5 / 6	(...) und (...) haben	4	e3
e5	9	erscheint geknickt	9	e7	e5	1	sucht sich immer	7	e4
e6	10	hat	11	m5	e6	9	wird betrachtet	9	m2
e7	9	bleibt länger in	10	e8	e7	9	erscheint geknickt	9	e5
e8	12	erscheint (leicht) verschoben	12	e10	e8	9	bleibt länger in	10	e7
e9	12	ist in	13	e9	e9	12	liegt in	13	e9
e10	3	hat	16	e11	e10	12	scheint verschoben zu liegen in	4	m5
e11	16	(ist) höher als (bei)	17	m9	e11	3	hat höheren	16	e10
e12	1	wählt	3	e12	e12	1	wählt	3	e12
e13	3	ist möglichst senkrecht zu	18	e13	e13	3	steht möglichst senkrecht zu	18	e13
e14	8	rekonstruiert	19	e15	e14	12	ist zu erreichen	12	m7
e15	9	fällt (konjunktiv) komplett gebrochen auf	12	e17	e15	8	rekonstruiert	19	e14
e16	9	hätte	20	e16	e16	9	hätte	20	e16
m1	3	muss betrachtet werden bei	e1	-	e17	9	fällt komplett gebrochen auf	12	e15
m2	e5	wenn man betrachtet	9	-	e18	12	erscheint leicht verschoben	12	e8
m3	e5	da	e4	m2	m1	e1	dabei	e2	m11
m4	e8	wenn	e9	m6	m2	6	dabei	e5	-
m5	e8	in	14	-	m3	e7	wenn	e6	m4
m6	m5	zu	15	m7	m4	e5	dadurch	m3	-
m7	e13	um zu erreichen	12	m11	m5	e8	mit	11	-
m8	e14	aus	20	m12	m6	m4	da	m5	-
m9	e16	wenn	e15	m13	m7	e10	zu	15	m6
m10	m9	daher	e8	-	m8	e9	so	m7	m4
m11	e1	dabei	m1	m1	m9	e11	als	17	-
m12	m7	aber	e14	m14	m10	m9	daher	e12	-
					m11	m10	um	e14	m7
					m12	e15	aus	20	m8
					m13	e16	wenn	e17	m9
					m14	m11	aber	e15	m12
					m15	e15	daher	e18	-
$n(c1 \in C2)_{f01-B} = 24/28$					$n(c2 \in C1)_{f01-B} = 26/33$				

Kodierung der fachlichen Korrektheit für fo1-B

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
e1	Licht	breitet sich unterschiedlich aus in	versch. Medien	1	1
e2	optischer Weg	gilt zu betrachten	optischer Weg	1	1
e3	optischer Weg	ergibt sich aus	Produkt	1	1
e4	Brechungsindex. zurückgelegter Weg	(...) und (...) haben	Produkt	1	1
e5	Licht	sucht sich immer	kürzester optischer Weg	1	1
e6	(spezieller) Lichtstrahl	wird betrachtet	(spezieller) Lichtstrahl	1	1
e7	(spezieller) Lichtstrahl	erscheint geknickt	(spezieller) Lichtstrahl	1	1
e8	(spezieller) Lichtstrahl	bleibt länger in	Medium (Luft)	1	1
e9	Münze	liegt in	Wasser	1	1
e10	Münze	scheint verschoben zu liegen in	Vergleich	1	1
e11	Wasser	hat	höherer Brechungsindex	1	1
e12	Licht	wählt	optischer Weg	1	1
e13	optischer Weg	steht möglichst senkrecht zu	Wasseroberfläche	0	0
e14	Münze	ist zu erreichen	Münze	1	1
e15	Beobachter	rekonstruiert	Bild	1	1
e16	(spezieller) Lichtstrahl	hätte	Verlauf	1	1
e17	(spezieller) Lichtstrahl	fällt komplett gebrochen auf	Münze	0	0
e18	Münze	erscheint leicht verschoben	Münze	1	1
m1	Licht breitet sich unterschiedlich aus in versch. Medien	dabei	gilt zu betrachten optischer Weg	1	1
m2	(spezieller) Lichtstrahl wird betrachtet	dabei	Licht sucht sich immer kürzester optischer Weg	1	1
m3	(spezieller) Lichtstrahl erscheint geknickt	wenn	(spezieller) Lichtstrahl wird betrachtet	1	1
m4	Licht sucht sich immer kürzester optischer Weg	dadurch	(spezieller) Lichtstrahl erscheint geknickt wenn (spezieller) Lichtstrahl wird betrachtet	1	1
m5	(spezieller) Lichtstrahl bleibt länger in Medium	mit	kleinerer Brechungsindex	1	1
m6	Licht sucht sich immer kürzester optischer Weg dadurch (spezieller) Lichtstrahl erscheint geknickt wenn (spezieller) Lichtstrahl wird betrachtet	da	(spezieller) Lichtstrahl bleibt länger in Medium mit kleinerer Brechungsindex	1	1
m7	Münze scheint verschoben zu liegen in Vergleich	zu	leeres Becken	1	1
m8	Münze liegt in Wasser	so	Münze scheint verschoben zu liegen in Vergleich zu leeres Becken	1	1
m9	Wasser hat höherer Brechungsindex	als	Luft	1	1
m10	Wasser hat höherer Brechungsindex als Luft	daher	Licht wählt optischer Weg	1	1
m11	Wasser hat höherer Brechungsindex als Luft daher Licht wählt optischer Weg	um	Münze ist zu erreichen	0	0
m12	Beobachter rekonstruiert Bild	aus	Verlauf	1	1
m13	(spezieller) Lichtstrahl hätte Verlauf	wenn	(spezieller) Lichtstrahl fällt komplett gebrochen auf Münze	0	0
m14	Wasser hat höherer Brechungsindex als Luft daher Licht wählt optischer Weg um Münze ist zu erreichen	aber	Beobachter rekonstruiert Bild	1	1
m15	Beobachter rekonstruiert Bild	daher	Münze erscheint leicht verschoben	1	1

hoI-C

Kodierung der Elemente für hoI-C

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Beobachter	2	2	Mensch, Auge, Gehirn (Stift im Wasser)
2	Stift (1)	2	2	
3	Wasser	2	2	(Stift nicht im Wasser)
4	Krümmung	2	2	
5	Stift (2)	2	2	
6	optischer Effekt	3	3	
7	Brechung	3	3	Lichtstrahl (ins Auge einfallendes Licht)
8	Laserstrahl	2	2	
9	Lichtstrahlen	3	3	
10	einfallendes Licht	3	3	
11	gerade Lichtbahn	3	3	
12	Knick	3	2	
13	Wasseroberfläche	2	2	
14	Bild	3	3	
15	gebrochene Lichtstrahlen	3	3	
16	Wahrnehmung	2	2	
17	Punkt	2	2	
18	Einfluss	3	3	

$\alpha_{hoI-C} = 0,89$

Kodierung der Beziehungen für hor-C

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C ₁	ID	S	Label	T	C ₁
e1	1	betrachtet	2	e1	e1	1	betrachtet	2	e1
e2	2	ist in	3	e2	e2	2	ist in	3	e2
e3	2	hat	4	e4	e3	4	lässt sich feststellen	4	e4
e4	4	lässt sich feststellen	4	e3	e4	2	hat	4	e3
e5	5	liegt nicht in	3	e5	e5	5	liegt nicht in	3	e5
e6	4	ist relativ zu	5	e6	e6	4	ist relativ zu	5	e6
e7	4	(entspricht)	7	e8	e7	6	ist wie bei	4	e9
e8	8	hat	4	e9	e8	4	ist	7	e7
e9	4	ist wie bei	6	e7	e9	8	hat	4	e8
e10	9	sind als geradlinig anzusehen	9	e11	e10	8	hat	7	-
e11	10	fällt ein in (/ zu)	1	e13	e11	9	werden als geradlinig angesehen	9	e10
e12	1	ordnet	11	e12	e12	1	ordnet	10	-
e13	9	macht	12	e14	e13	10	fällt ein in	1	e11
e14	9	verläuft nicht mehr geradlinig	9	e15	e14	9	macht	12	e13
e15	1	konstruiert	14	e17	e15	9	verläuft nicht mehr geradlinig	9	e15
e16	15	verlaufen geradlinig	15	e16	e16	9	verlaufen geradlinig	9	e16
e17	1	hat	16	e21	e17	1	konstruiert	14	e15
e18	2	wirkt geknickt in	16	e20	e18	1	nimmt wahr	14	e23
e19	6	hat	18	e23	e19	25	sind geradlinig verlaufen	15	-
e20	9	kommen von	2	e24	e20	2	wirkt in (...) geknickt	16	e18
e21	13	ist	17	-	e21	1	hat	16	e17
e22	9	sind unter	18	e22	e22	9	sind unter	18	e22
e23	1	nimmt wahr	14	e18	e23	6	hat	18	e19
m1	e1	so	e4	m1	e24	9	kommen von	1	e20
m2	e4	kann zurückgeführt werden auf	6	m2	m1	e1	so	e3	m1
m3	1	ist programmiert auf	e10	m3	m2	m1	kann zurückgeführt werden auf	6	-
m4	e12	zu	10	m4	m3	9	ist programmiert auf	e11	m3
m5	m3	d.h.	m4	m5	m4	e12	zu	11	m4
m6	e13	an	13	m6	m5	m3	heißt	m4	m5
m7	m4	bezogen auf	2	m5	m17	m4	verhält sich bezogen auf	2	m7
m8	m4	aber	m6	-	m6	e14	an	13	m6
m9	m6	und daher	e15	m7	m7	m6	daher	e15	m9
m10	1	denkt	e16	m10	m8	m17	aber so	m7	-
m11	m10	daher	e15	-	m9	1	denkt	e16	m10
m12	e15	gerade so, dass	e16	m12	m10	1	nimmt an	e19	m10
m13	m6	hingegen	m10	-	m11	m8	hingegen	m9	-
m14	e18	ab	13	m13	m12	e14	gerade so, dass	m10	-
m15	e22	also ab	17	m14	m13	e20	ab	13	m14
					m14	e22	ab	17	m15
					m15	e20	also ab	m14	-
					m16	m12	daher	m15	-
$n(c1 \in C2)_{b01-C} = 34/38$					$n(c2 \in C1)_{b01-C} = 32/41$				

Kodierung der fachlichen Korrektheit für hor-C

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C ₁	C ₂
e1	Beobachter	betrachtet	Stift (1)	1	1
e2	Stift (1)	ist in	Wasser	1	1
e3	Stift (1)	hat	Krümmung	1	1
e4	Krümmung	lässt sich feststellen	Krümmung	1	1
e5	Stift (2)	liegt nicht in	Wasser	1	1
e6	Krümmung	ist relativ zu	Stift (2)	1	1
e7	Krümmung	(entspricht)	Brechung	0	1
e8	Laserstrahl	hat	Krümmung	1	1
e9	Krümmung	ist wie bei	optischer Effekt	1	1
e10	Lichtstrahlen	sind als geradlinig anzusehen	Lichtstrahlen	1	1
e11	einfallendes Licht	fällt ein in (/ zu)	Beobachter	1	1
e12	Beobachter	ordnet	gerade Lichtbahn	1	1
e13	Lichtstrahlen	macht	Knick	1	1
e14	Lichtstrahlen	verläuft nicht mehr geradlinig	Lichtstrahlen	1	1
e15	Beobachter	konstruiert	Bild	1	1
e16	Lichtstrahlen	verlaufen geradlinig	Lichtstrahlen	1	1
e17	Beobachter	hat	Wahrnehmung	1	1
e18	Stift (1)	wirkt geknickt in	Wahrnehmung	1	1
e19	optischer Effekt	hat	Einfluss	1	1
e20	Lichtstrahlen	kommen von	Stift (1)	1	1
e21	Wasseroberfläche	ist	Punkt	0	1
e22	Lichtstrahlen	sind unter	Einfluss	1	1
e23	Beobachter	nimmt wahr	Bild	1	1
m1	Beobachter betrachtet Stift (1)	so	Krümmung lässt sich feststellen	1	1
m2	Krümmung lässt sich feststellen	kann zurückgeführt werden auf	optischer Effekt	1	1
m3	Beobachter	ist programmiert auf	Lichtstrahlen sind als geradlinig anzusehen	1	1
m4	Beobachter ordnet gerade Lichtbahn	zu	einfallendes Licht	1	1
m5	Beobachter ist programmiert auf Lichtstrahlen	d.h.	Beobachter ordnet gerade Lichtbahn zu	1	1
m6	Lichtstrahlen macht Knick	an	Wasseroberfläche	1	1
m7	Beobachter ordnet gerade Lichtbahn zu	bezogen auf	Stift (1)	1	1
m8	Beobachter ordnet gerade Lichtbahn zu	aber	Lichtstrahlen macht Knick an Wasseroberfläche	1	1
m9	einfallendes Licht				
m9	Lichtstrahlen macht Knick an Wasseroberfläche	und daher	Beobachter konstruiert Bild	1	1
m10	Beobachter	denkt	Lichtstrahlen verlaufen geradlinig	1	1
m11	Beobachter denkt Lichtstrahlen verlaufen	daher	Beobachter konstruiert Bild	1	1
m11	geradlinig				
m12	Beobachter konstruiert Bild	gerade so, dass	Lichtstrahlen verlaufen geradlinig	1	1
m13	Lichtstrahlen macht Knick an Wasseroberfläche	hingegen	Beobachter denkt Lichtstrahlen verlaufen	1	1
m13	geradlinig				
m14	Stift (1) wirkt geknickt in Wahrnehmung	ab	Wasseroberfläche	1	1
m15	Lichtstrahlen sind unter Einfluss	von	optischer Effekt	1	1
m16	Lichtstrahlen sind unter Einfluss von optischer	ab	Punkt	1	1
m16	Effekt				
m17	Stift (1) wirkt geknickt in Wahrnehmung ab	also ab	Punkt	1	1
m17	Wasseroberfläche				

ho2-A

Kodierung der Elemente für ho2-A

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Lichtstrahl	3	3	Strahl
2	Laserstrahl	2	2	
3	Medium (1)	2	2	
4	Medium (2)	2	2	anderes Medium,
5	Übergang	3	3	Durchgang
6	Luft	2	0	
7	Brechungsindex (1)	3	3	(von Luft)
8	Wasser	2	0	
9	Brechungsindex (2)	3	3	(von Wasser)
10	dichteres Medium	3	3	n1
11	dünneres Medium	3	3	n2, Eintrittsmedium
12	Lot	3	3	
13	Winkeländerung	3	3	
14	Gleichung	3	3	
15	Sinus (Einfallswinkel)	3	3	
16	Sinus (Brechungswinkel)	3	3	
17	große Einfallswinkel	4	4	
18	Totalreflexion	4	4	
19	Durchgang	0	2	
20	Einfallswinkel	0	3	
21	Brechungswinkel	0	3	
$n_{ho2-A} = 0,62$				

Kodierung der Beziehungen für ho2-A

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C1	ID	S	Label	T	C1
e1	1	ist hier	2	e3	e1	1	dringt in (...) ein	4	e2
e2	1	dringt ein in	4	e1	e2	1	wird gebrochen	1	e2
e3	5	ist hier zu sehen	5	e4	e3	1	ist hier	2	e1
e4	6	hat	7	e7	e4	5	ist zu sehen	5	e4
e5	7	ist 1	7	e8	e5	2	hat	5	m2
e6	8	hat	9	e9	e6	5	passiert aus	6	m3
e7	9	ist 1,33	1	e10	e7	6	hat	7	e4
e8	5	erfolgt in	11	e11	e8	7	Ist 1	7	e5
e9	1	wird gebrochen hin zu	12	e12	e9	8	hat	9	e9
e10	13	wird bestimmt mit	14	e13	e10	9	Ist 1,33	9	e7
e11	15	mal	9	e14	e11	5	erfolgt in	11	e8
e12	16	mal	7	e15	e12	1	wird hin zu (...) gebrochen	12	e9
e13	1	wird weg gebrochen von	12	e16	e13	13	kann bestimmt werden mit	14	e10
e14	18	kann (auftreten)	18	e18	e14	15	mal	9	e11
e15	1	ist nicht mehr zu sehen in	10	e19	e15	16	mal	7	e12
e16	1	wird gebrochen	1	e2	e16	1	wird weggebrochen von	12	e13
m1	e2	von	3	m1	e17	5	passiert zu	11	m13
m2	e3	von	2	-	e18	18	kann auftreten bei	17	m14
m3	e3	aus	6	-	e19	1	ist gar nicht mehr zu sehen in	10	e15
m4	e4	in	8	m4	m1	e1	von	3	m1
m5	e8	von	10	m2	m2	e11	von	10	m5
m6	m4	also	m5	-	m3	e4	also	M 2	m6
m7	e9	in	8	m5	m4	e6	in	8	m4
m8	e9	ist	13	m6	m5	e12	in	8	m7
m9	e11	ist gleich	e12	m7	m6	m5	entspricht	13	-
m10	14	ist	m9	m8	m7	e14	ist gleich	e15	m9
m11	e13	bei	5	m10	m8	14	Ist	m7	m11
m12	e13	von	10	-	m9	e17	von	10	-
m13	e13	zu	11	-	m10	e16	bei	m9	-
m14	e14	bei	17	e18	m11	e18	entspricht	e19	m15
m15	m14	heißt	e15	m11					
$n(c1 \in C2)_{ho2-A} = 26/31$					$n(c2 \in C1)_{ho2-A} = 27/30$				

xoi-B

Kodierung der fachlichen Korrektheit für ho2-A

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
e1	Lichtstrahl	ist hier	Laserstrahl	0	1
e2	Lichtstrahl	dringt ein in	Medium (2)	1	1
e3	Übergang	ist hier zu sehen	Übergang	1	1
e4	Luft	hat	Brechungsindex (1)	1	1
e5	Brechungsindex (1)	ist 1	Brechungsindex (1)	1	1
e6	Wasser	hat	Brechungsindex (2)	1	1
e7	Brechungsindex (2)	ist 1,33	Brechungsindex (2)	1	1
e8	Übergang	erfolgt in	dünneres Medium	1	0
e9	Lichtstrahl	wird gebrochen hin zu	Lot	1	1
e10	Winkeländerung	wird bestimmt mit	Gleichung	1	1
e11	Sinus (Einfallswinkel)	mal (wird multipliziert mit)	Brechungsindex (1)	1	1
e12	Sinus (Brechungswinkel)	mal (wird multipliziert mit)	Brechungsindex (2)	1	1
e13	Lichtstrahl	wird weg gebrochen von	Lot	1	1
e14	Totalreflexion	kann (auftreten)	Totalreflexion	1	1
e15	Lichtstrahl	ist nicht mehr zu sehen in	dichteres Medium	1	1
e16	Lichtstrahl	wird gebrochen	Lichtstrahl	1	1
m1	Lichtstrahl dringt ein in Medium (2)	von	Medium (1)	1	1
m2	Übergang ist hier zu sehen	von	Laserstrahl	1	1
m3	Übergang ist hier zu sehen	aus	Luft	1	1
m4	Übergang ist hier zu sehen aus Luft	in	Wasser	1	1
m5	Übergang erfolgt in dünneres Medium	von	dichteres Medium	1	1
m6	Übergang ist hier zu sehen aus Luft in Wasser	also	Übergang erfolgt in dünneres Medium von dichterem Medium	0	0
m7	Lichtstrahl wird gebrochen hin zu Lot	in	Wasser	1	1
m8	Lichtstrahl wird gebrochen hin zu Lot	ist	Winkeländerung	1	1
m9	Sinus (Einfallswinkel) mal (wird multipliziert mit)	ist gleich	Sinus (Brechungswinkel) mal (wird multipliziert mit) Brechungsindex (2)	1	1
m10	Brechungsindex (1) Gleichung	ist	Sinus (Einfallswinkel) mal (wird multipliziert mit) Brechungsindex (1) ist gleich Sinus (Brechungswinkel) mal (wird multipliziert mit) Brechungsindex (2)	1	1
m11	Lichtstrahl wird weg gebrochen von Lot	bei	Übergang	1	1
m12	Lichtstrahl wird weg gebrochen von Lot	von	dichteres Medium	1	1
m13	Lichtstrahl wird weg gebrochen von Lot	zu	dünneres Medium	1	1
m14	Totalreflexion kann (auftreten)	bei	große Einfallswinkel	1	1
m15	Totalreflexion kann (auftreten) bei große Einfallswinkel	heißt	Lichtstrahl ist nicht mehr zu sehen in dichterem Medium	1	1

Kodierung der Elemente für x01-B

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Verhalten	3	3	
2	Licht	3	3	
3	Strahlen	3	3	(allg.)
4	Raumrichtungen	3	3	
5	Luft	2	2	
6	Wasser	2	2	
7	Münze (1)	2	2	(links)
8	Münze (2)	2	2	(rechts)
9	Aquarium (1)	2	2	(links), luftgefülltes Aquarium
10	Aquarium (2)	2	2	(rechts), wassergefülltes Aquarium
11	Lichtstrahlen (1)	3	3	(links)
12	Lichtstrahlen (2)	3	3	(rechts), Strahlen
13	beliebiger Punkt	2	2	(allg.)
14	Münze (allg.)	3	0	
15	Vielzahl	3	3	
16	Medium (allg.)	2	2	
17	Medium (links)	2	0	
18	Medium (rechts)	2	0	
19	Auge	2	2	
20	Beobachter	2	2	
21	Linse	3	2	
22	Ursprungspunkt (allg.)	3	3	Punkt
23	Bildpunkt	3	3	
24	Netzhaut	3	2	
25	Strahlen (links, hinten)	3	0	
26	Ursprung (links, hinten)	3	0	
27	hinterer Teil	2	2	
28	Strahlen (links, vorn)	3	0	
29	vorderer Teil	2	2	
30	Richtung (links, zum Auge)	3	3	
31	Innenseite	2	2	
32	weiße Aquariumswand	2	2	
33	Brechungsgesetz	3	3	
34	Grenzfläche	3	3	
35	Richtung (rechts, zum Auge)	3	3	
36	Wechsel (1)	3	3	(von Wasser zu Luft), Medienwechsel
37	Lot	3	3	
38	unveränderlicher Fall	4	4	
39	Ursprungspunkt (2)	3	0	
40	Weise	3	3	

$x_{x01-B} = 0, 63$

Kodierung der Beziehungen für x01-B

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C ₁	ID	S	Label	T	C ₁
e1	2	hat	1	e2	e1	1	lässt sich mit Hilfe von (...) modellieren	3	e2
e2	1	lässt sich modellieren mit Hilfe von	3	e1	e2	2	zeigt	1	e1
e3	11	geht aus von	7	e3	e3	11	geht aus von	7	e3
e4	12	geht aus von	8	e4	e4	12	geht aus von	8	e4
e5	13	(ist) auf	14	e5	e5	7	ist in	9	m1
e6	3	haben	15	e9	e6	8	ist in	10	m2
e7	15	geht aus von	13	e8	e7	13	ist auf	14	e7
e8	3	verlaufen immer geradlinig innerhalb von	16	e10	e8	15	geht aus von	13	e7
e9	17	ist	5	e11	e9	15	besteht aus	3	e6
e10	17	umgibt	7	e12	e10	3	verlaufen immer geradlinig innerhalb	16	e8
e11	18	ist	6	e13	e11	17	ist	5	e9
e12	18	umgibt	8	-	e12	17	umgibt	7	e10
e13	20	hat	19	e15	e13	18	ist	6	e11
e14	3	erreichen	19	e14	e14	3	erreichen	19	e14
e15	19	hat	21	e18	e15	20	hat	19	e13
e16	21	lenkt ab	3	e16	e16	21	lenkt (...) ab	3	e16
e17	3	(gehen aus von)	22	e17	e17	22	hat	3	e17
e18	3	laufen zusammen auf	23	e19	e18	19	hat	21	e15
e19	23	(ist) auf	24	e20	e19	3	laufen zusammen auf	23	e18
e20	25	haben	26	e22	e20	23	liegt auf	24	e19
e21	7	hat	27	e23	e21	25	Können nur (...) erreichen	19	e22
e22	25	erreichen	19	e21	e22	25	haben	26	e20
e23	28	(kommen von)	29	e24	e23	7	hat	27	e23
e24	7	hat	29	e25	e23a	28	treffen lediglich auf	31	e26
e25	28	sind ausgerichtet in	30	e27	e24	28	gehen aus von	29	e23
e26	28	treffen lediglich	31	e23	e25	7	hat	29	e25
e27	32	hat	31	e26	e26	32	hat	31	e27
e28	7	ist nur halb zu sehen	7	e29	e27	28	sind ausgerichtet in	30	e25
e29	10	ist gefüllt mit	6	e31	e28	19	hat	30	-
e30	12	ändern schlagartig ihre	35	e30	e29	7	ist nur halb zu sehen	7	e28
e31	12	werden weggebrochen von	37	e32	e30	12	ändern schlagartig	35	e30
e32	37	(ist) auf	34	e34	e31	10	ist gefüllt mit	6	e29
e33	12	sind gerichtet zur	34	-	e32	12	werden weggebrochen vom	37	e31
e34	12	verlaufen flacher nach	36	e35	e33	36	findet statt zwischen (...) und (...)	6 / 5	m15/m16
e35	12	sind nicht gerichtet zu	19	e36	e34	37	ist auf	34	e32
e36	12	erreichen	19	e37	e35	12	verlaufen flacher nach	36	e34
e37	12	sind steiler gerichtet	12	e38	e36	12	sind nicht zum (...) hin ausgerichtet	19	e35
e38	12	verlaufen flacher nach	34	e39	e37	12	erreichen	19	e37
e39	12	verlaufen dann in	35	e40	e38	12	sind steiler ausgerichtet	12	e37
e40	12	(kommen von)	22	e43	e39	12	verlaufen flacher nach	34	e38
e41	12	scheinen nicht zu kommen von	22	e42	e40	12	verlaufen in	35	e39
e42	39	ist höher gelegen	39	e44	e41	19	hat	35	-
e43	39	ist versetzt hin zu	19	e45	e42	12	scheinen nicht von (...) zu sein	22	e41
e44	12	scheinen zu kommen von	39	e44	e43	12	gehen aus von	22	e40
e45	22	(sind) auf	8	e46	e44	12	scheinen zu kommen von höher gelegnem	39	-
e46	8	erscheint nach oben und vorn verschoben	8	e47	e45	39	ist zum (...) hinversetzt	19	e43
e47	8	ist vollständig zu sehen in	10	e48	e46	22	liegen auf	8	e45
m1	e3	in	9	-	e47	8	erscheint nach oben und vorn verschoben	8	e46
m2	e4	in	10	-	e48	8	ist vollständig zu sehen in	10	e47
m3	e7	in	4	m1	e49	12	gibt es für jeden	22	m27
m4	e9	in	9	m2	e50	12	erreichen	19	(doppelt)
m5	e11	in	10	m3	m1	e8	in	4	m3
m6	e16	sodass	e18	m4	m2	e11	in	9	m4
m7	e20	in	27	m6	m3	e13	in	10	m5
m8	e22	im Fall von	9	m5	m4	e16	so	e19	m6
m9	e25	(zum)	19	-	m5	e21	im Fall von	9	m8
m10	e26	deshalb	e28	m7	m6	e22	in	27	m7
m11	e30	entsprechend	33	m9	m7	e23	deshalb	e29	m10
m12	m11	an	34	-	m8	e30	an	34	m12
m13	m12	im Fall von	10	m10	m9	m8	entsprechend	33	-
m14	e31	für (/ bei)	36	m11	m10	m9	im Fall von	10	m13
m15	m14	von	6	-	m11	e32	für	36	m14
m16	m14	nach	5	-	m12	m11	bis auf	38	-
m17	e31	bis auf	38	m12	m13	m12	heißt	e35	-
m18	e33	von	8	-	m14	e36	innerhalb	6	m20
m19	e31	heißt	e34	m13	m15	m14	sondern	e38	m21
m20	e35	innerhalb	6	m14	m16	e39	dann	e40	-
m21	m20	sondern	e37	m15	m17	e42	für	19	m22
m22	e39	(zum)	19	-	m18	e42	sondern	e44	m23
m23	e41	sondern	e44	m18	m19	m18	gilt für alle	22	m25
m24	m23	für	19	m17	m20	e47	da	m19	m26
m25	m24	gilt für alle	22	m19	m21	e50	auf	40	m29
m26	e46	da	m25	m20	m22	e48	weil	e50	m30
m27	e36	für jeden	22	-	m23	40	ist	m18	m29
m28	m27	auf	40	-					
m29	m24	ist	40	m23					
m30	e47	weil	m28	-					

 $n(c1 \in C2)_{x01-B} = 64/77$ $n(c2 \in C1)_{x01-B} = 67/74$

Kodierung der fachlichen Korrektheit für xoi-B (Teil 1)

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
e1	Licht	hat	Verhalten	1	1
e2	Verhalten	lässt sich modellieren mit Hilfe von	Strahlen	1	1
e3	Lichtstrahlen (1)	geht aus von	Münze (1)	1	1
e4	Lichtstrahlen (2)	geht aus von	Münze (2)	1	1
e5	beliebiger Punkt	(ist) auf	Münze (allg.)	1	1
e6	Strahlen	haben	Vielzahl	1	1
e7	Vielzahl	geht aus von	beliebiger Punkt	1	1
e8	Strahlen	verlaufen immer geradlinig innerhalb von	Medium (allg.)	1	1
e9	Medium (links)	ist	Luft	1	1
e10	Medium (links)	umgibt	Münze (1)	1	1
e11	Medium (rechts)	ist	Wasser	1	1
e12	Medium (rechts)	umgibt	Münze (2)	1	1
e13	Beobachter	hat	Auge	1	1
e14	Strahlen	erreichen	Auge	1	1
e15	Auge	hat	Linse	1	1
e16	Linse	lenkt ab	Strahlen	1	1
e17	Strahlen	(gehen aus von)	Ursprungspunkt (allg.)	1	1
e18	Strahlen	laufen zusammen auf	Bildpunkt	1	1
e19	Bildpunkt	(ist) auf	Netzhaut	1	1
e20	Strahlen (links, hinten)	haben	Ursprung (links, hinten)	1	1
e21	Münze (1)	hat	hinterer Teil	1	1
e22	Strahlen (links, hinten)	erreichen	Auge	1	1
e23	Strahlen (links, vorn)	(kommen von)	vorderer Teil	1	1
e24	Münze (1)	hat	vorderer Teil	1	1
e25	Strahlen (links, vorn)	sind ausgerichtet in	Richtung (links, zum Auge)	1	1
e26	Strahlen (links, vorn)	treffen lediglich	Innenseite	1	1
e27	weiße Aquariumswand	hat	Innenseite	1	1
e28	Münze (1)	ist nur halb zu sehen	Münze (1)	1	1
e29	Aquarium (2)	ist gefüllt mit	Wasser	1	1
e30	Lichtstrahlen (2)	ändern schlagartig ihre	Richtung (rechts, zum Auge)	1	1
e31	Lichtstrahlen (2)	werden weggebrochen von	Lot	1	1
e32	Lot	(ist) auf	Grenzfläche	1	1
e33	Lichtstrahlen (2)	sind gerichtet zur	Grenzfläche	1	1
e34	Lichtstrahlen (2)	verlaufen flacher nach	Wechsel	1	1
e35	Lichtstrahlen (2)	sind nicht gerichtet zu	Auge	1	1
e36	Lichtstrahlen (2)	erreichen	Auge	1	1
e37	Lichtstrahlen (2)	sind steiler gerichtet	Lichtstrahlen (2)	1	1
e38	Lichtstrahlen (2)	verlaufen flacher nach	Grenzfläche	1	1
e39	Lichtstrahlen (2)	verlaufen dann in	Richtung (rechts, zum Auge)	1	1
e40	Lichtstrahlen (2)	(kommen von)	Ursprungspunkt (allg.)	1	1
e41	Lichtstrahlen (2)	scheinen nicht zu kommen von	Ursprungspunkt (allg.)	1	1
e42	Ursprungspunkt (2)	ist höher gelegen	Ursprungspunkt (2)	1	1
e43	Ursprungspunkt (2)	ist versetzt hin zu	Auge	1	1
e44	Lichtstrahlen (2)	scheinen zu kommen von	Ursprungspunkt (2)	1	1
e45	Ursprungspunkt (allg.)	(sind) auf	Münze (2)	1	1
e46	Münze (2)	erscheint nach oben und vorn verschoben zu sein	Münze (2)	1	1
e47	Münze (2)	ist vollständig zu sehen in	Aquarium (2)	1	1

Kodierung der fachlichen Korrektheit für xoi-B (Teil 2)

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
m1	Lichtstrahlen (1) geht aus von Münze (1)	in	Aquarium (1)	1	1
m2	Lichtstrahlen (2) geht aus von Münze (2)	in	Aquarium (2)	1	1
m3	Vielzahl geht aus von beliebiger Punkt	in	Raumrichtungen	1	1
m4	Medium (links) ist Luft	in	Aquarium (1)	1	1
m5	Medium (rechts) ist Wasser	in	Aquarium (2)	1	1
m6	Linse lenkt ab Strahlen	sodass	Strahlen laufen zusammen auf Bildpunkt	1	1
m7	Strahlen (links, hinten) haben Ursprung (links, hinten)	in	hinterer Teil	1	1
m8	Strahlen (links, hinten) erreichen Auge	im Fall von	Aquarium (1)	1	1
m9	Strahlen (links, vorn) sind ausgerichtet in Richtung (links, zum Auge)	(zum)	Auge	1	1
m10	Strahlen (links, vorn) treffen lediglich Innenseite	deshalb	Münze (1) ist nur halb zu sehen Münze (1)	1	1
m11	Lichtstrahlen (2) ändern schlagartig ihre Richtung (rechts, zum Auge)	entsprechend	Brechungsgesetz	1	1
m12	Lichtstrahlen (2) ändern schlagartig ihre Richtung (rechts, zum Auge) entsprechend Brechungsgesetz	an	Grenzfläche	1	1
m13	Lichtstrahlen (2) ändern schlagartig ihre Richtung (rechts, zum Auge) entsprechend Brechungsgesetz an Grenzfläche	im Fall von	Aquarium (2)	1	1
m14	Lichtstrahlen (2) werden weggebrochen von Lot	für (/ bei)	Wechsel	1	1
m15	Lichtstrahlen (2) werden weggebrochen von Lot für (/ bei) Wechsel	von	Wasser	1	1
m16	Lichtstrahlen (2) werden weggebrochen von Lot für (/ bei) Wechsel	nach	Luft	1	1
m17	Lichtstrahlen (2) werden weggebrochen von Lot	bis auf	unveränderlicher Fall	1	1
m18	Lichtstrahlen (2) sind gerichtet zur Grenzfläche	von	Münze (2)	1	1
m19	Lichtstrahlen (2) werden weggebrochen von Lot	heißt	Lichtstrahlen (2) verlaufen flacher nach Wechsel	1	1
m20	Lichtstrahlen (2) sind nicht gerichtet zu Auge	innerhalb	Wasser	1	1
m21	Lichtstrahlen (2) sind nicht gerichtet zu Auge innerhalb Wasser	sondern	Lichtstrahlen (2) sind steiler gerichtet	1	1
m22	Lichtstrahlen (2) verlaufen dann in Richtung (rechts, zum Auge)	(zum)	Auge	1	1
m23	Lichtstrahlen (2) scheinen nicht zu kommen von Ursprungspunkt (allg.)	sondern	Lichtstrahlen (2) scheinen zu kommen von Ursprungspunkt (2)	1	1
m24	Lichtstrahlen (2) scheinen nicht zu kommen von Ursprungspunkt (allg.) sondern Lichtstrahlen (2) scheinen zu kommen von Ursprungspunkt (2)	für	Auge	1	1
m25	Lichtstrahlen (2) scheinen nicht zu kommen von Ursprungspunkt (allg.) sondern Lichtstrahlen (2) scheinen zu kommen von Ursprungspunkt (2) für Auge	gilt für alle	Ursprungspunkt (allg.)	1	1
m26	Münze (2) erscheint nach oben und vorn verschoben zu sein	da	Lichtstrahlen (2) scheinen nicht zu kommen von Ursprungspunkt (allg.) sondern Lichtstrahlen (2) scheinen zu kommen von Ursprungspunkt (2) für Auge gilt für alle Ursprungspunkt (allg.)	1	1
m27	Lichtstrahlen (2) erreichen Auge	für jeden	Ursprungspunkt (allg.)	1	1
m28	Lichtstrahlen (2) erreichen Auge für jeden Ursprungspunkt (allg.)	auf	Weise	1	1
m29	Lichtstrahlen (2) scheinen nicht zu kommen von Ursprungspunkt (allg.) sondern Lichtstrahlen (2) scheinen zu kommen von Ursprungspunkt (2) für Auge	ist	Weise	1	1
m30	Münze (2) ist vollständig zu sehen in Aquarium (2)	weil	Lichtstrahlen (2) erreichen Auge für jeden Ursprungspunkt (allg.) auf Weise	1	1

x02-A

Kodierung der Elemente für x02-A

ID	Label	Coder 1	Coder 2	Synonyme / Bemerkung
1	Lichtbündel	3	3	
2	optische Grenzfläche	3	3	
3	Ausbreitungsrichtung	3	3	
4	Lot	3	3	
5	Licht	3	3	
6	Medien	2	2	(allg.), Medium
7	charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	3	3	Geschwindigkeit, Lichtgeschwindigkeit
8	Grenze	3	3	(ebene) Mediengrenze
9	Medium (1)	3	2	
10	Medium (2)	3	0	
11	Vakuum	3	3	oder doch 4?
12	erste Näherung	3	3	
13	Dichte	3	3	
14	Ausnahmen	3	3	
15	Huygenssches Prinzip	3	3	
16	Änderung	3	3	
17	Richtungsänderung	3	3	
18	Modellierung	3	3	
19	Ausbreitung	3	3	
20	ebene Wellenfront	3	3	
21	Elementarwellen	3	3	Welle
22	Einhüllende	3	3	
23	dünneres Medium	3	3	weniger dichtes Medium
24	dichteres Medium	3	3	
25	geometrische Betrachtung	3	3	
26	beschriebener Fall	3	3	
27	Winkel	3	3	
$n_{x02-A} = 0,78$				

Kodierung der Beziehungen für x02-A

Coder 1					Coder 2				
ID	S	Label	T	C2	ID	S	Label	T	C1
e1	1	trifft auf	2	e1	e1	1	trifft auf	2	e1
e2	1	hat	3	e3	e2	1	wird geändert in	3	e3
e3	1	wird geändert in	3	e2	e3	1	hat	3	e2
e4	5	hat	7	e4	e4	5	hat	7	e4
e5	8	ist zwischen ... (und) ...	9, 10	e6	e5	1	trifft auf	8	e6
e6	1	trifft auf	8	e5	e6	8	ist zwischen (...) und (...)	9/10	e5
e7	7	ändert sich	7	e7	e7	7	ändert sich	7	e7
e8	7	ist maximal in	11	e8	e8	7	ist maximal in	11	e8
e9	6	hat	13	e10	e9	7	nimmt ab mit	13	e10
e10	7	nimmt ab mit	13	e9	e10	6	hat	13	e9
e11	14	gibt es	14	e11	e11	14	gibt es	14	e11
e12	17	ergibt sich aus	16	e12	e12	17	ergibt sich aus	16	e12
e13	7	hat (/vollzieht)	16	e13	e13	7	hat	16	e13
e14	15	ist	18	e14	e14	15	ist	18	e14
e15	18	beschreibt	1	m8	e15	1	wird idealisiert als	16	-
e16	20	wird zusammengesetzt beschrieben aus	21	e17	e16	20	hat	16	-
e17	21	hat	22	e18	e17	20	setzt sich zusammen aus	21	e16
e18	22	ergibt	20	e19	e18	21	haben	22	e17
e19	20	trifft auf	8	e20	e19	22	ergibt	20	e18
e20	21	breiten sich langsamer aus in	24	e23	e20	20	trifft auf	8	e19
e21	19	(unterliegt)	17	e25	e21	20	kommt aus	23	m11
e22	20	(erfährt)	19	e26	e22	8	befindet sich zu	24	m13
e23	17	ergibt sich	17	e25	e23	21	breiten sich langsamer aus in	24	e20
e24	21	setzt man zusammen	21	e24	e24	21	werden zusammengesetzt	21	e24
e25	21	pflanzt sich wieder geradlinig fort in	24	e28	e25	17	ergibt sich in	19	e21
m1	e3	hin zu	4	m1	e26	20	hat	19	e22
m2	e4	in	6	m2	e27	17	ist gerichtet zu	4	m1
m3	e6	dann	e7	m3	e28	21	pflanzt sich wieder geradlinig fort in	24	e25
m4	e10	in	12	m4	m1	e2	hin zu	4	m1
m5	m4	aber	e11	m5	m2	e4	in	6	m2
m6	e12	nach	15	m7	m3	e5	so	e7	m3
m7	m6	an	8	m6	m4	e9	gilt in	12	m4
m8	e15	als	19	-	m5	m4	aber	e11	m5
m9	m8	von	20	-	m6	e12	an	8	m7
m10	m9	dabei	e16	m9	m7	m6	nach	15	m6
m11	e19	von	23	-	m8	18	entspricht	e15	-
m12	m11	unter	27	-	m9	e15	dabei	e17	m10
m13	m12	zu	24	-	m10	e20	unter	27	m12
m14	m13	dann	e20	m12	m11	e23	als im weniger	23	m15
m15	m14	als in	23	-	m12	m10	so	m11	m14
m16	e23	wenn	e24	m14	m13	e25	aus	25	m13
m17	m1	in	26	m15	m14	e24	so	m13	m16
					m15	e27	in	26	m17
					m16	26	entspricht	m14	-
$n(c1 \in C2)_{x02-A} = 36/42$					$n(c2 \in C1)_{x02-A} = 40/44$				

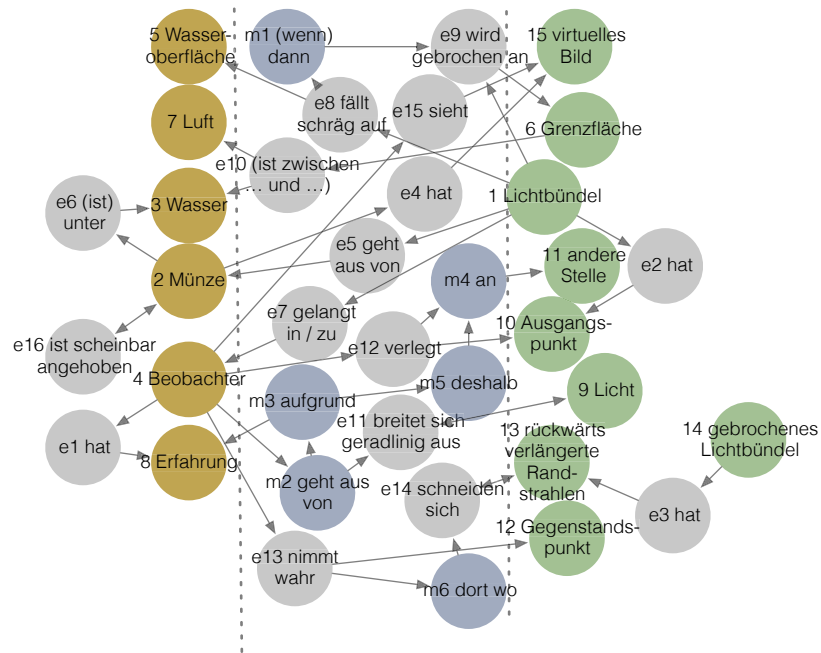
Kodierung der fachlichen Korrektheit für x02-A

ID	QUELLE	BEZIEHUNG	ZIEL	C1	C2
e1	Lichtbündel	trifft auf	optische Grenzfläche	1	1
e2	Lichtbündel	hat	Ausbreitungsrichtung	1	1
e3	Lichtbündel	wird geändert in	Ausbreitungsrichtung	1	1
e4	Licht	hat	charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	1	1
e5	Grenze	ist zwischen ... (und) ...	Medium (1), Medium (2)	1	1
e6	Lichtbündel	trifft auf	Grenze	1	1
e7	charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	ändert sich	charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	1	1
e8	charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	ist maximal in	Vakuum	1	1
e9	Medien	hat	Dichte	1	1
e10	charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	nimmt ab mit	Dichte	1	1
e11	Ausnahmen	gibt es	Ausnahmen	1	1
e12	Richtungsänderung	ergibt sich aus	Änderung	1	1
e13	charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	hat (/vollzieht)	Änderung	1	1
e14	Huygenssches Prinzip	ist	Modellierung	1	1
e15	Modellierung	beschreibt	Lichtbündel	1	1
e16	ebene Wellenfront	wird zusammengesetzt beschrieben aus	Elementarwellen	1	1
e17	Elementarwellen	hat	Einhüllende	1	1
e18	Einhüllende	ergibt	ebene Wellenfront	1	1
e19	ebene Wellenfront	trifft auf	Grenze	1	1
e20	Elementarwellen	breiten sich langsamer aus in	dichteres Medium	1	1
e21	Ausbreitung	(unterliegt)	Richtungsänderung	1	1
e22	ebene Wellenfront	(erfährt)	Ausbreitung	1	1
e23	Richtungsänderung	ergibt sich	Richtungsänderung	1	1
e24	Elementarwellen	setzt man zusammen	Elementarwellen	1	1
e25	Elementarwellen	pflanzt sich wieder geradlinig fort in	dichteres Medium	1	1
m1	Lichtbündel wird geändert in	hin zu	Lot	1	1
m2	Ausbreitungsrichtung				
m2	Licht hat charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	in	Medien	1	1
m3	Lichtbündel trifft auf Grenze	dann	charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	1	1
m4	charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	ändert sich	erste Näherung	1	1
m5	nimmt ab mit Dichte	erste Näherung			
m5	charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	aber	Ausnahmen gibt es	1	1
m6	nimmt ab mit Dichte in erste Näherung				
m6	Richtungsänderung ergibt sich aus Änderung	nach	Huygenssches Prinzip	1	1
m7	Richtungsänderung ergibt sich aus Änderung nach Huygenssches Prinzip	an	Grenze	1	1
m8	Modellierung beschreibt Lichtbündel	als	Ausbreitung	1	1
m9	Modellierung beschreibt Lichtbündel als Ausbreitung	von	ebene Wellenfront	1	1
m10	Modellierung beschreibt Lichtbündel als Ausbreitung von ebene Wellenfront	dabei	ebene Wellenfront wird zusammengesetzt beschrieben aus Elementarwellen	1	1
m11	ebene Wellenfront trifft auf Grenze	von	dünneres Medium	1	1
m12	ebene Wellenfront trifft auf Grenze von dünneres Medium	unter	Winkel	1	1
m13	ebene Wellenfront trifft auf Grenze von dünneres Medium unter Winkel	zu	dichteres Medium	1	1
m14	ebene Wellenfront trifft auf Grenze von dünneres Medium unter Winkel zu dichteres Medium	dann	Elementarwellen breiten sich langsamer aus in dichteres Medium	1	1
m15	Elementarwellen breiten sich langsamer aus in dichteres Medium	als in	dünneres Medium	1	1
m16	Richtungsänderung ergibt sich	wenn	Elementarwellen setzt man zusammen	1	1
m17	Lichtbündel wird geändert in Ausbreitungsrichtung hin zu Lot	in	beschriebener Fall	1	1
m18	Richtungsänderung ergibt sich	aus	geometrische Betrachtung	1	1

G KATEGORIENORIENTIERTE CONCEPT MAPS

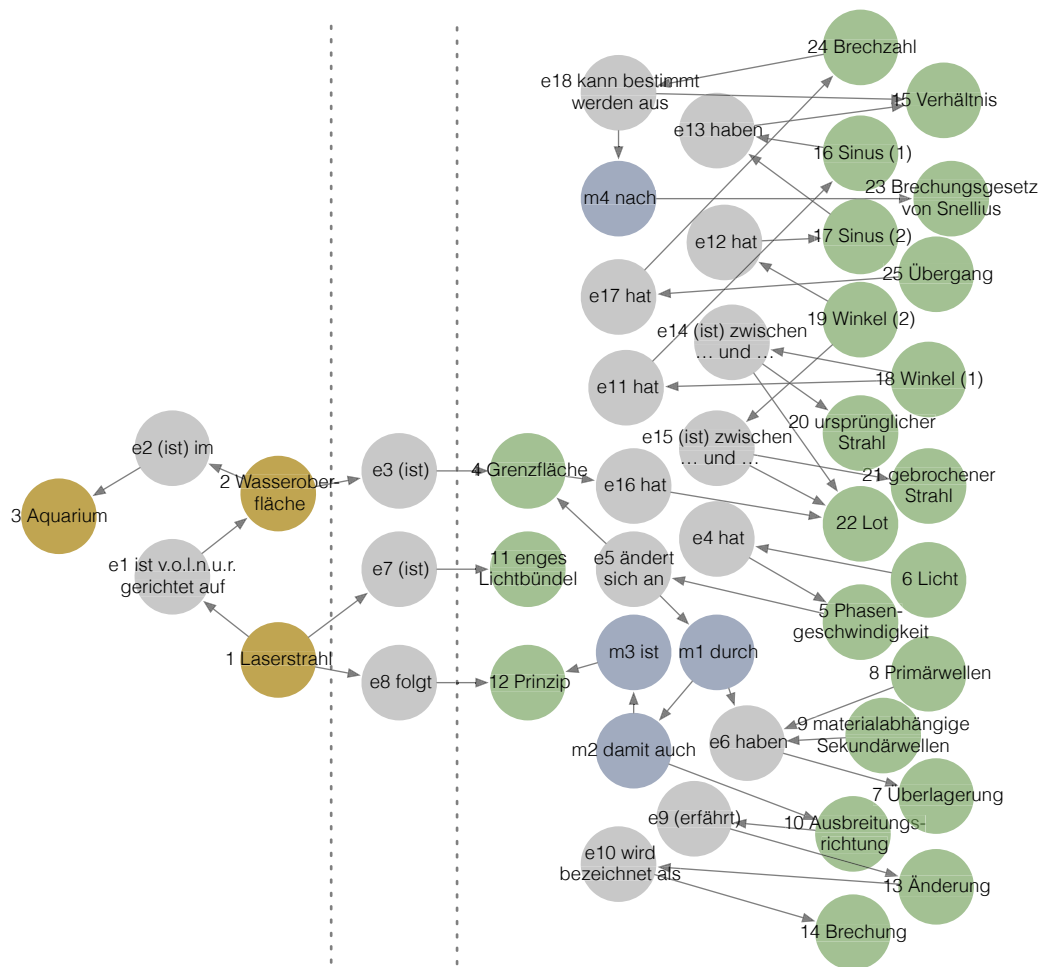
G.1 MAPS DER VORSTUDIE

br-B: Hebung



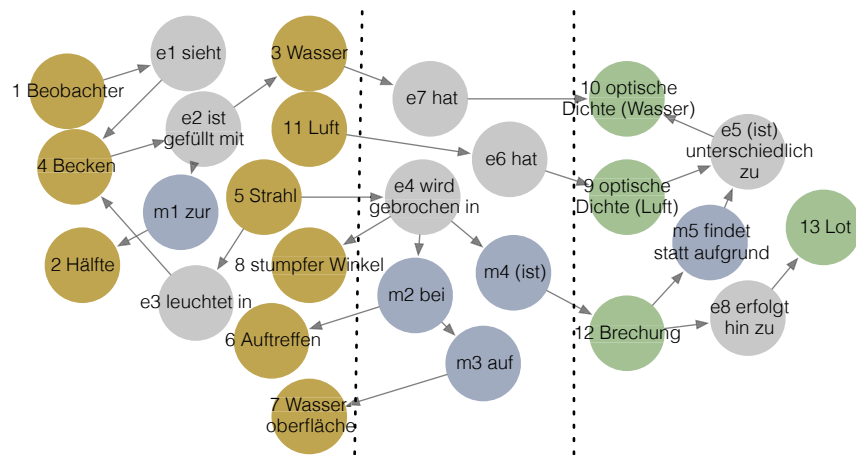
Concept Map zur Erklärung br-B

eo3-A: Laserstrahl



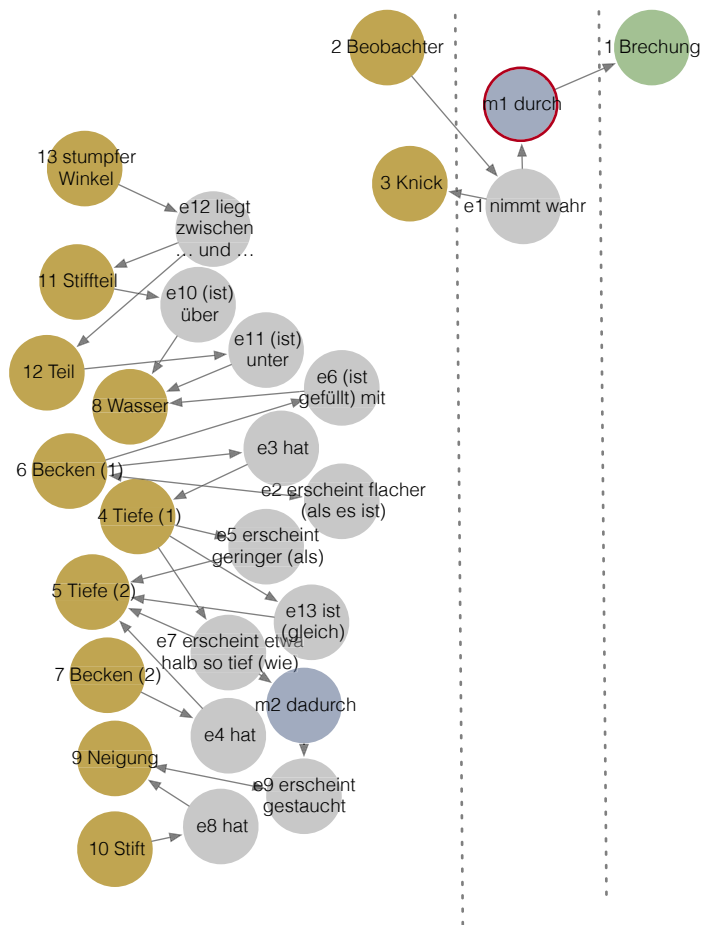
Concept Map zur Erklärung eo3-A

soi-A: Laserstrahl

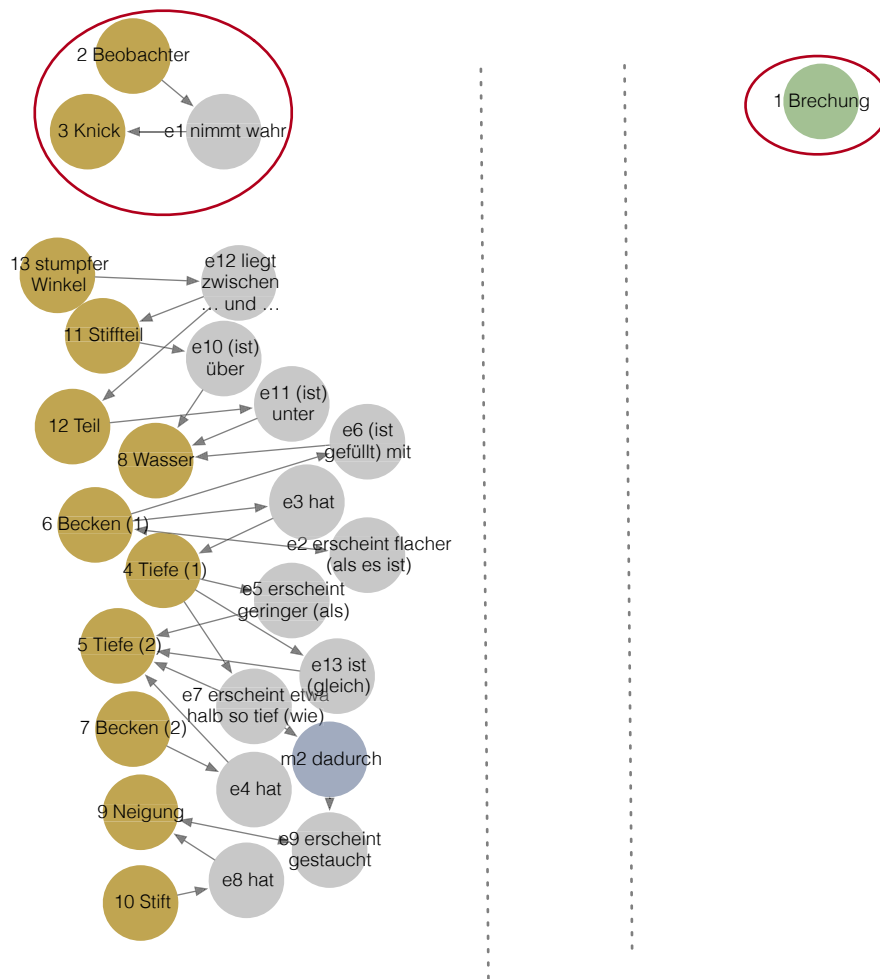


Concept Map zur Erklärung soi-A

soi-C: Bleistift

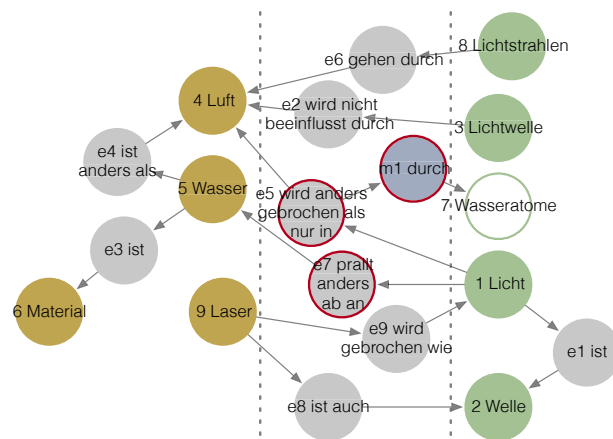


Concept Map zur Erklärung soi-C

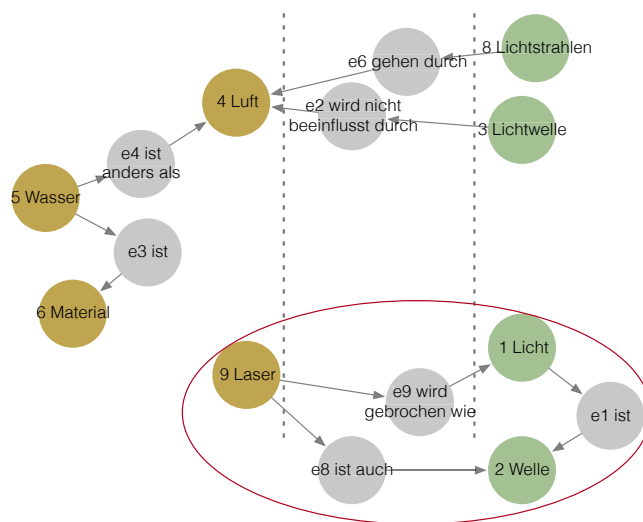


Concept Map zur Erklärung sor-C (bereinigt)

so4-A: Laserstrahl

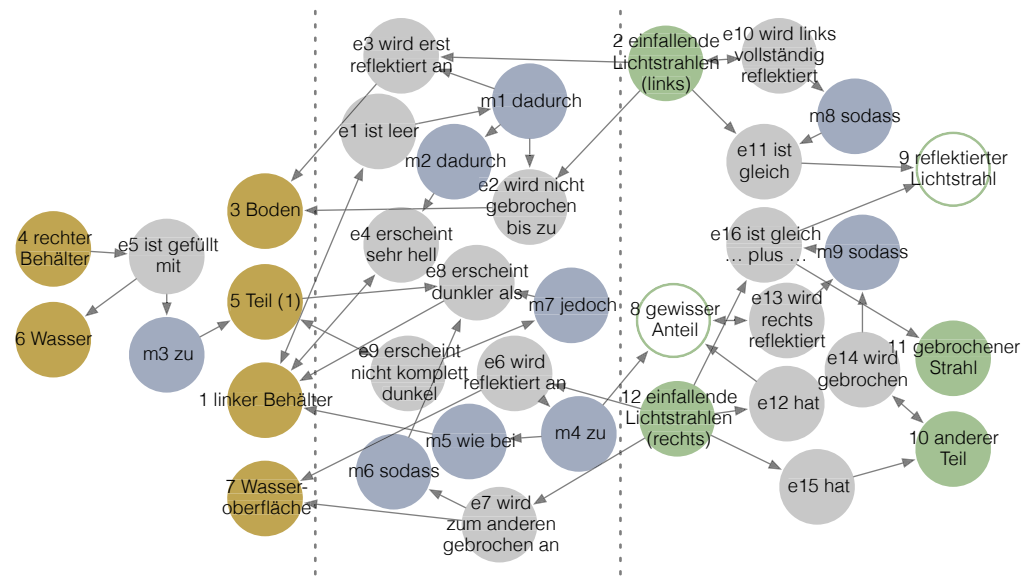


Concept Map zur Erklärung so4-A

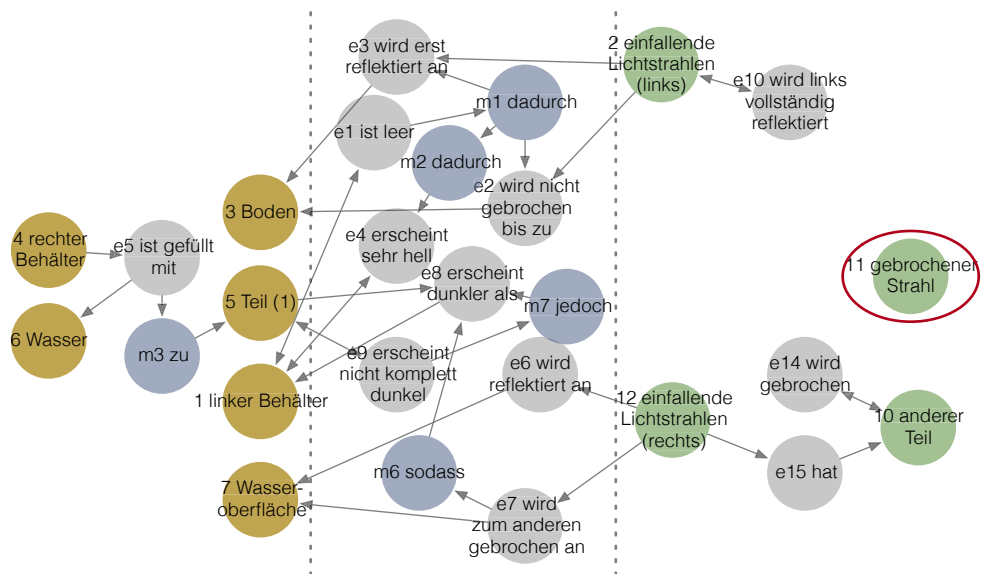


Concept Map zur Erklärung so4-A (bereinigt)

so6-B: Münzen

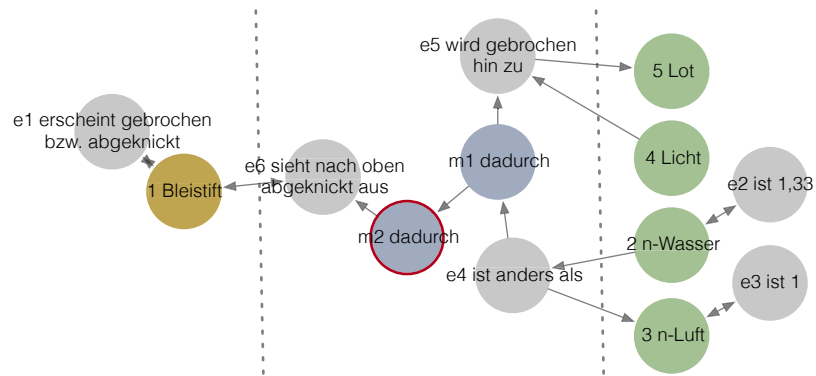


Concept Map zur Erklärung so6-B

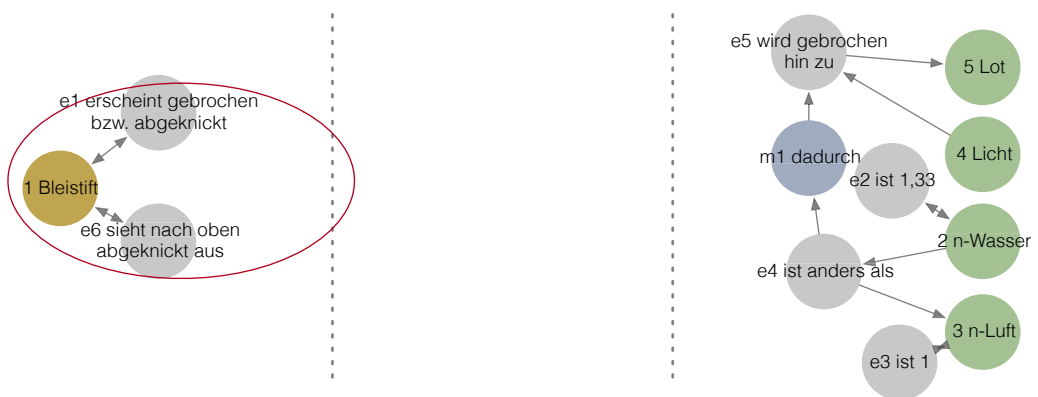


Concept Map zur Erklärung so6-B (bereinigt)

so7-C: Bleistift

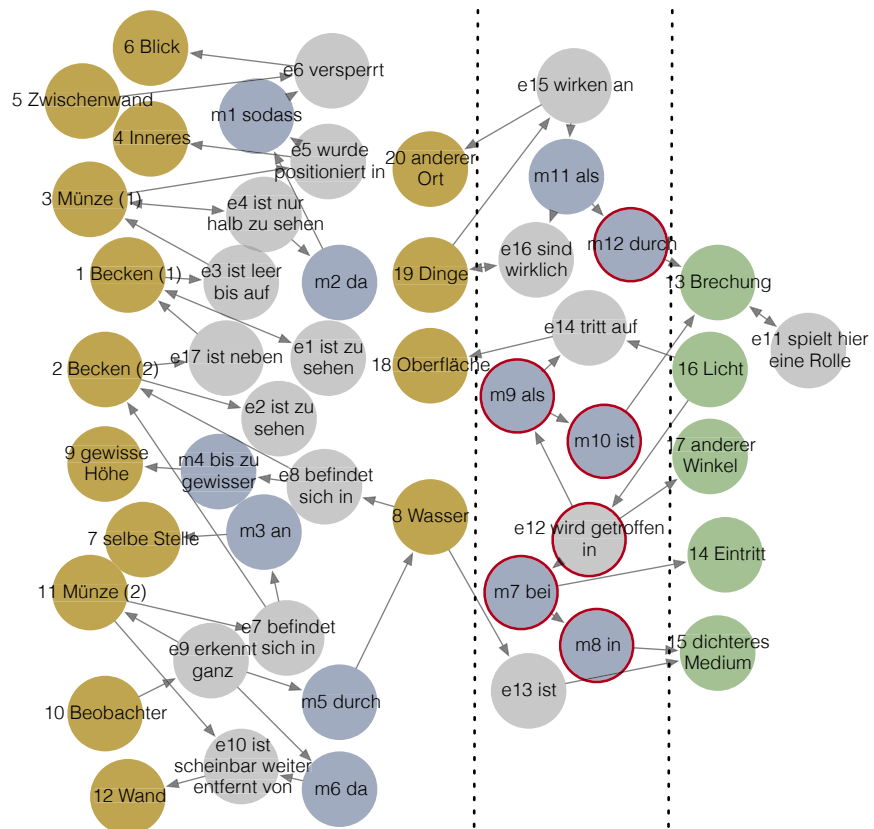


Concept Map zur Erklärung so7-C

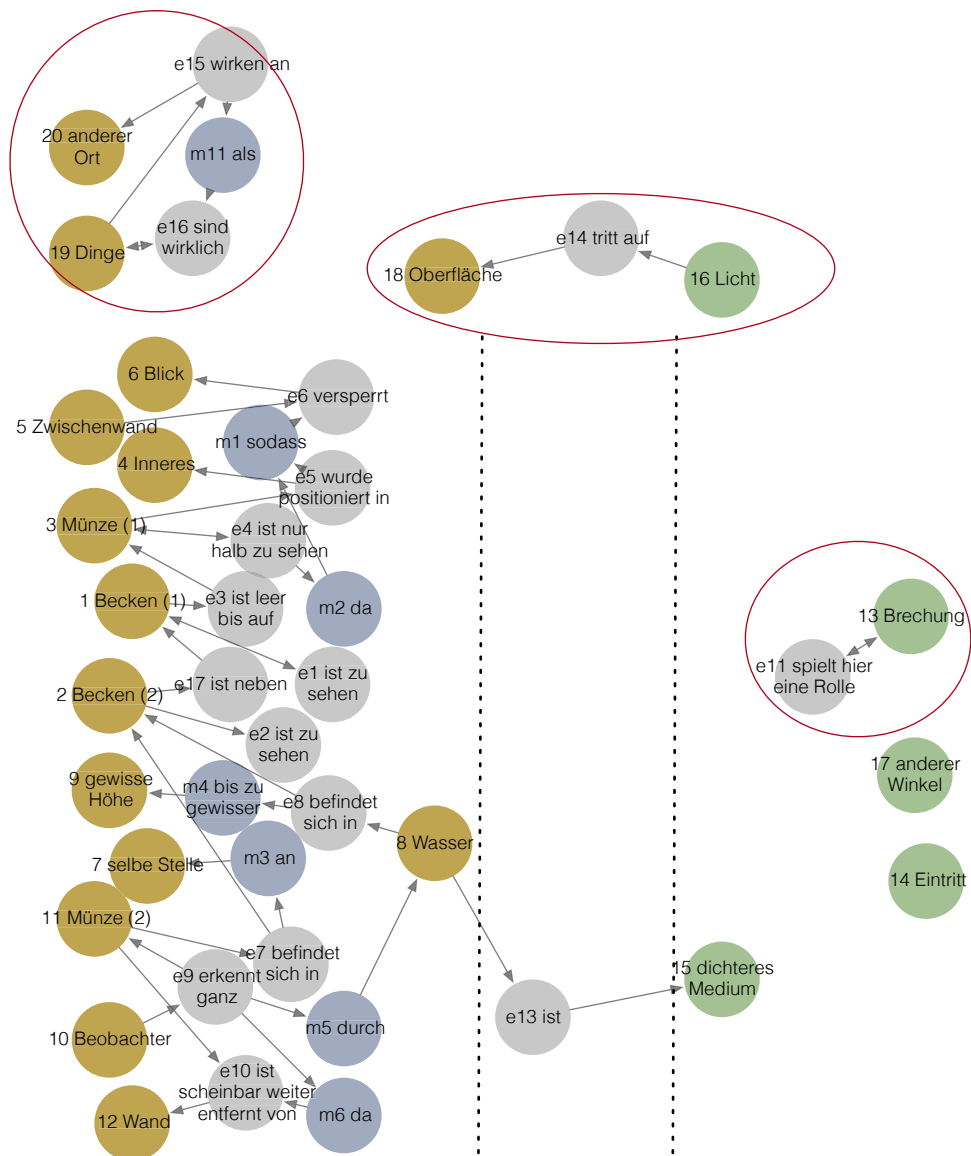


Concept Map zur Erklärung so7-C (bereinigt)

so9-B: Münzen



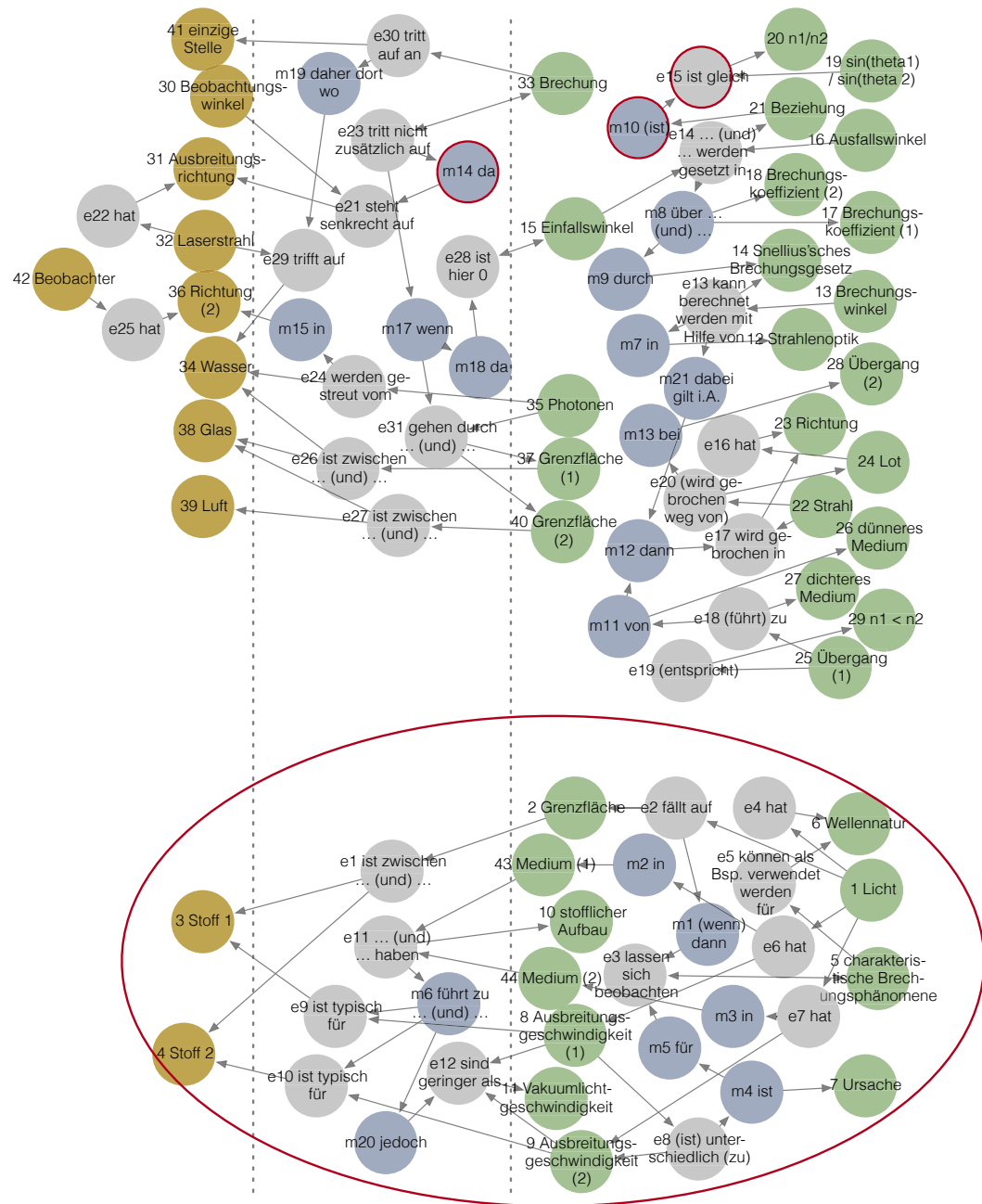
Concept Map zur Erklärung so9-B



Concept Map zur Erklärung so9-B (bereinigt)

G.2 MAPS DER HAUPTSTUDIE

aoi-A



Concept Map zur Erklärung aoi-A



Concept Map zur Erklärung aoi-A (bereinigt)

aoi-B

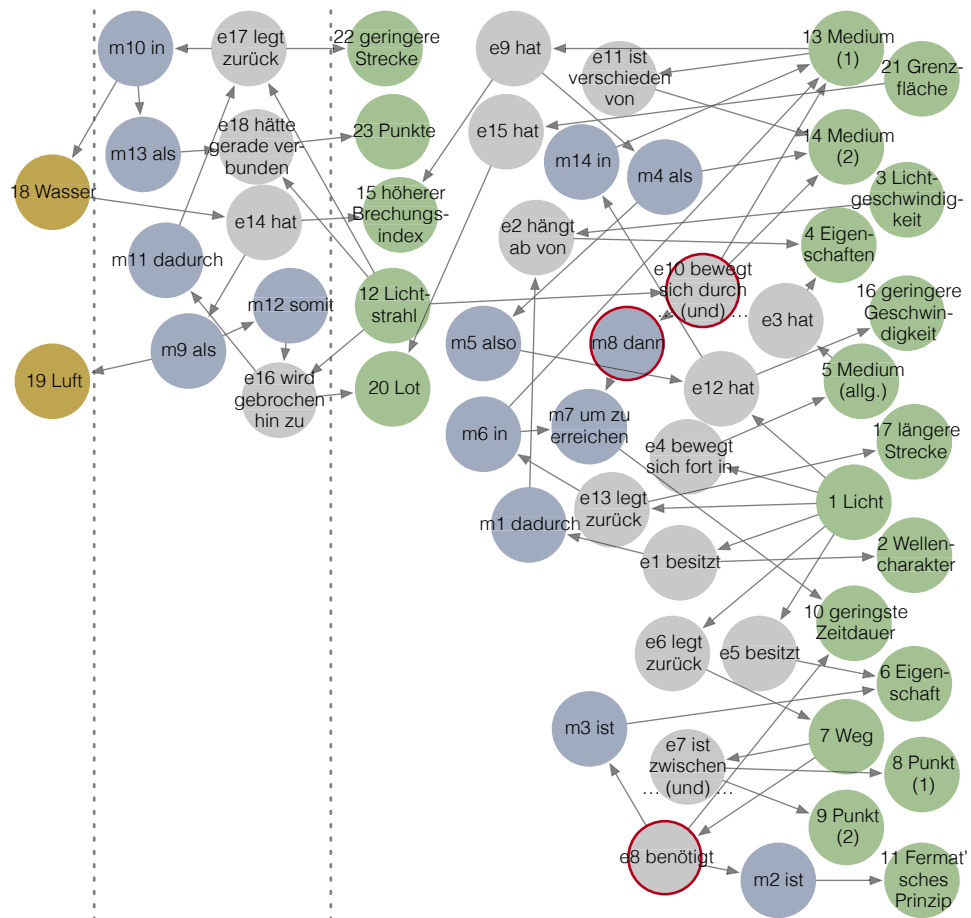


Concept Map zur Erklärung aoi-B



Concept Map zur Erklärung aoi-B (bereinigt)

ao2-A

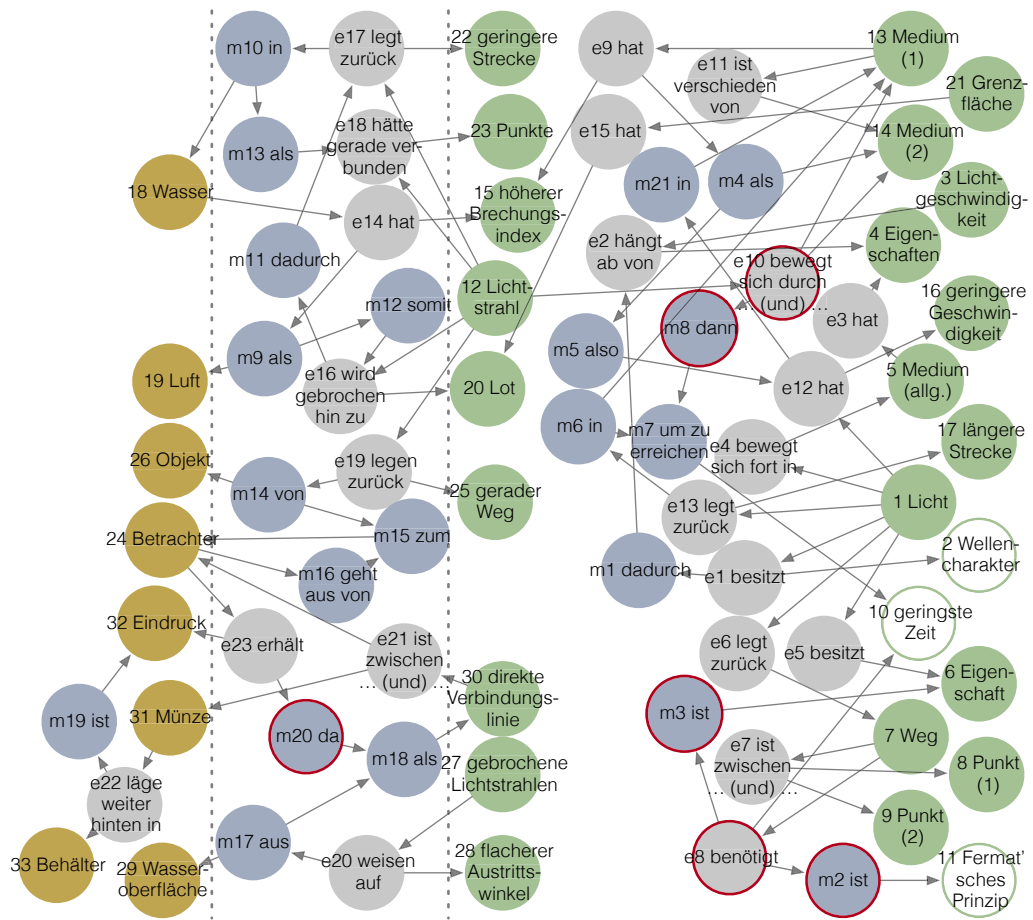


Concept Map zur Erklärung ao2-A

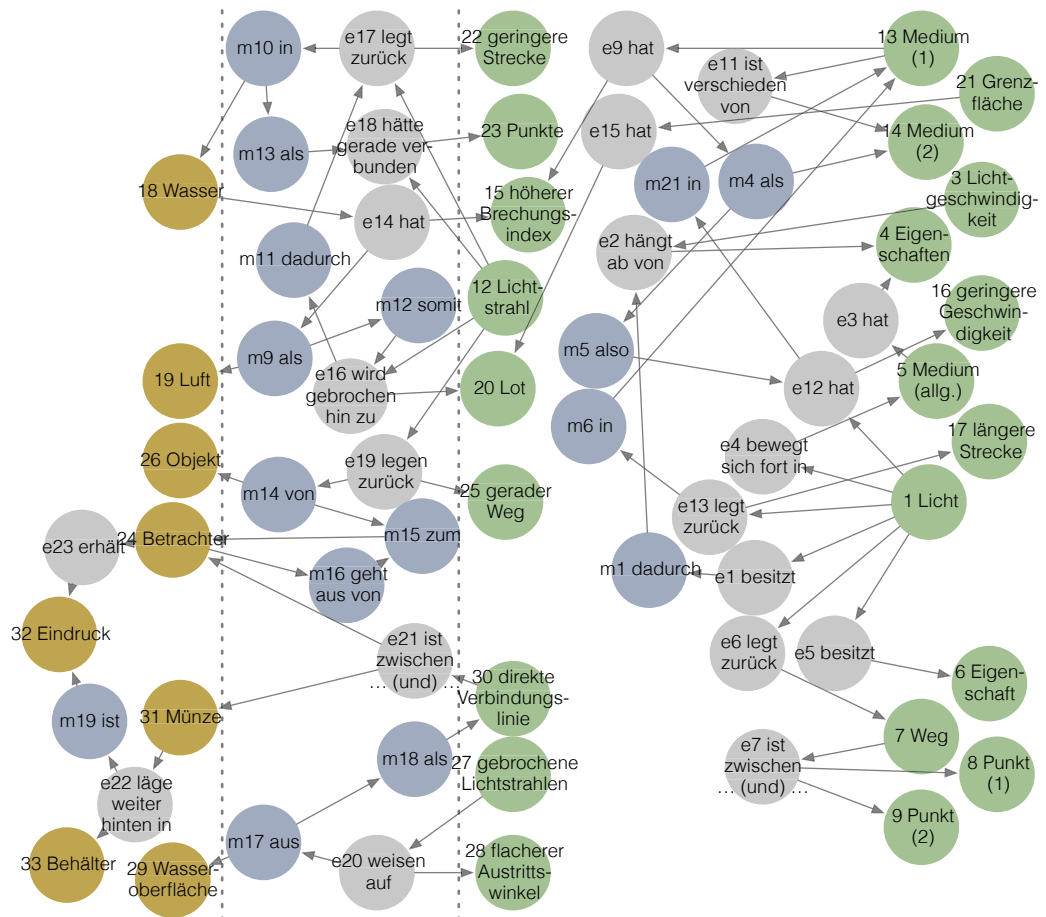


Concept Map zur Erklärung aoz-A (bereinigt)

ao2-B

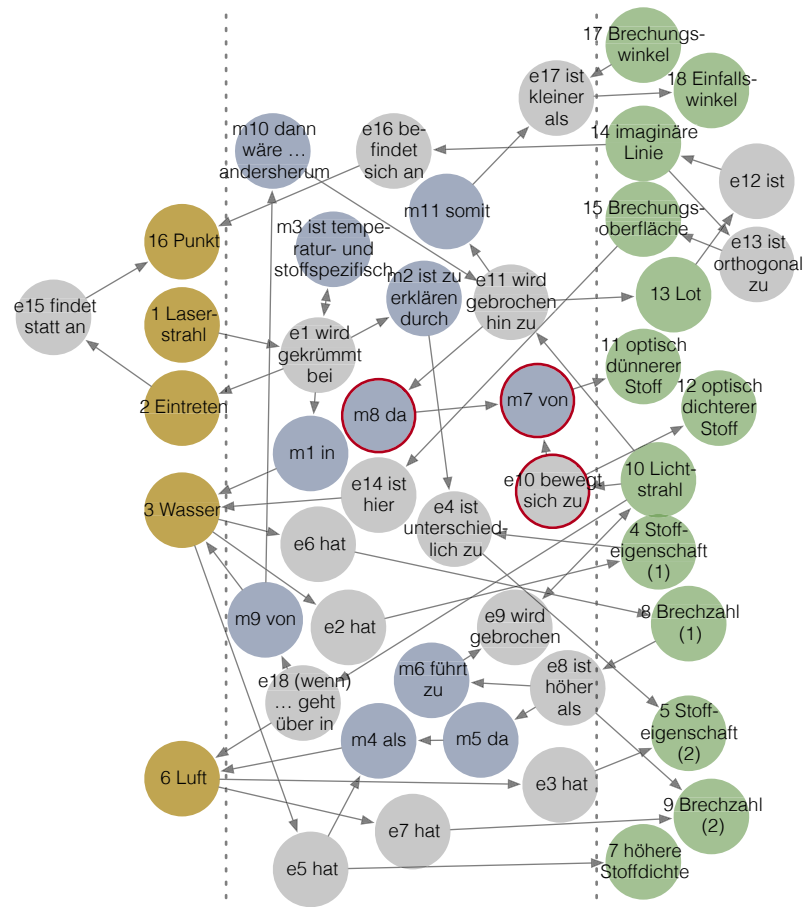


Concept Map zur Erklärung ao2-B

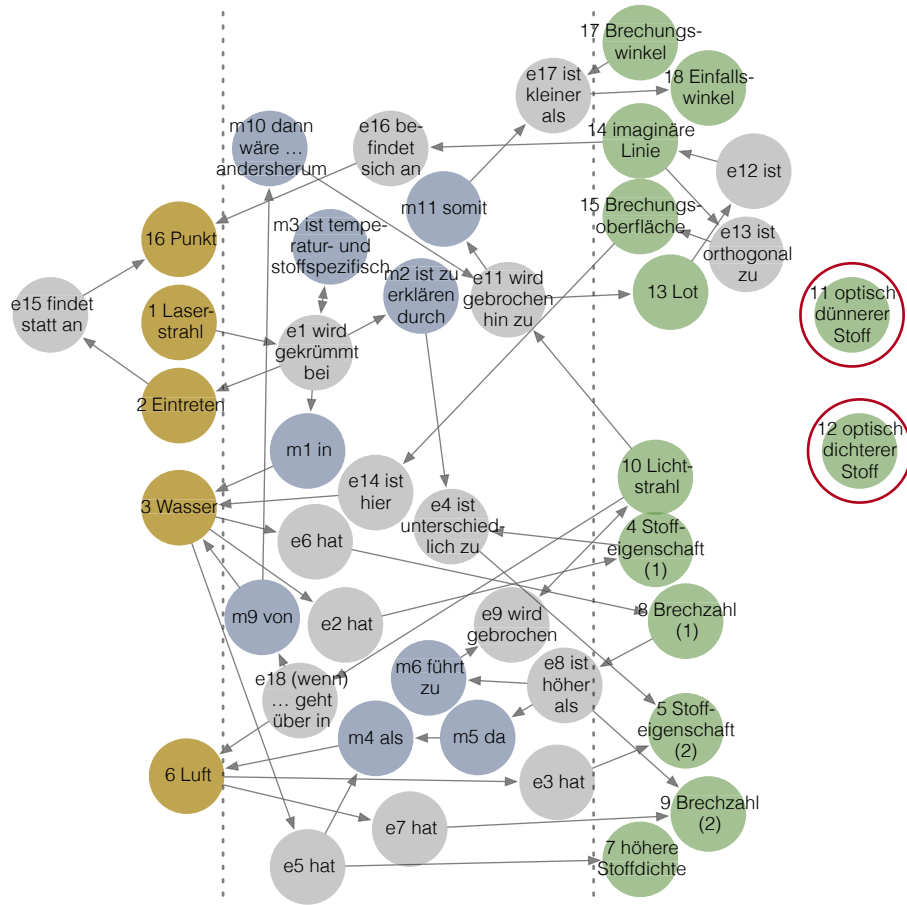


Concept Map zur Erklärung aoz-B (bereinigt)

ao3-A

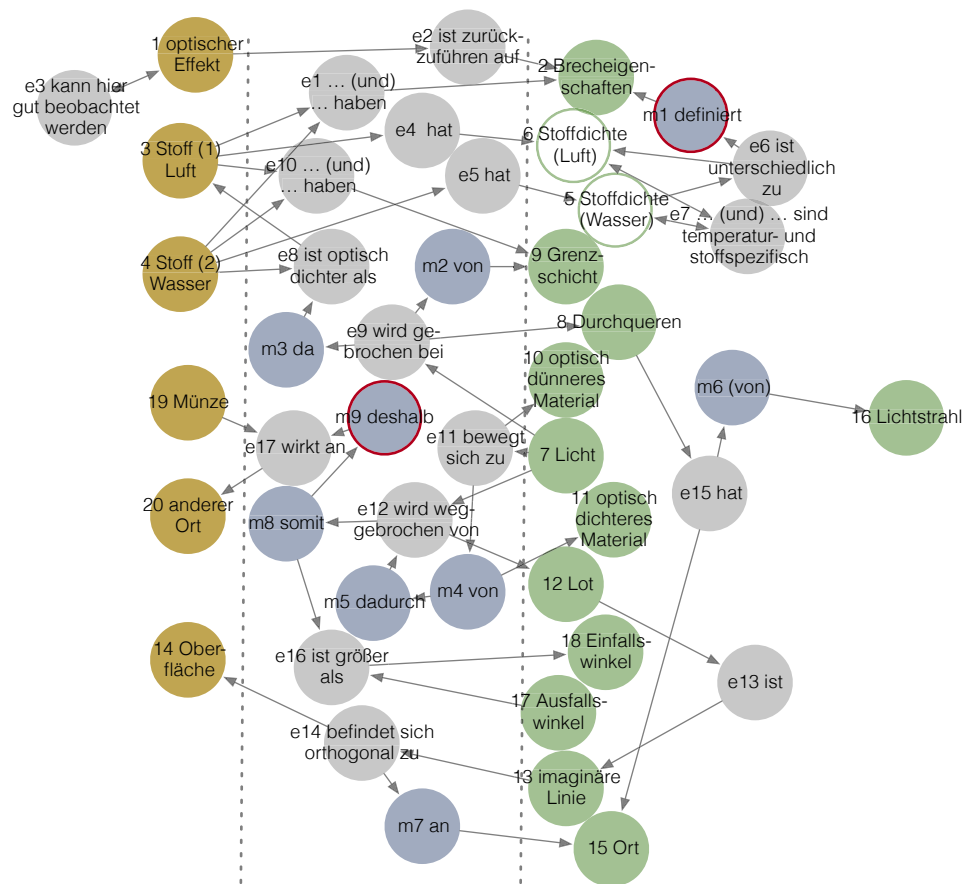


Concept Map zur Erklärung ao3-A

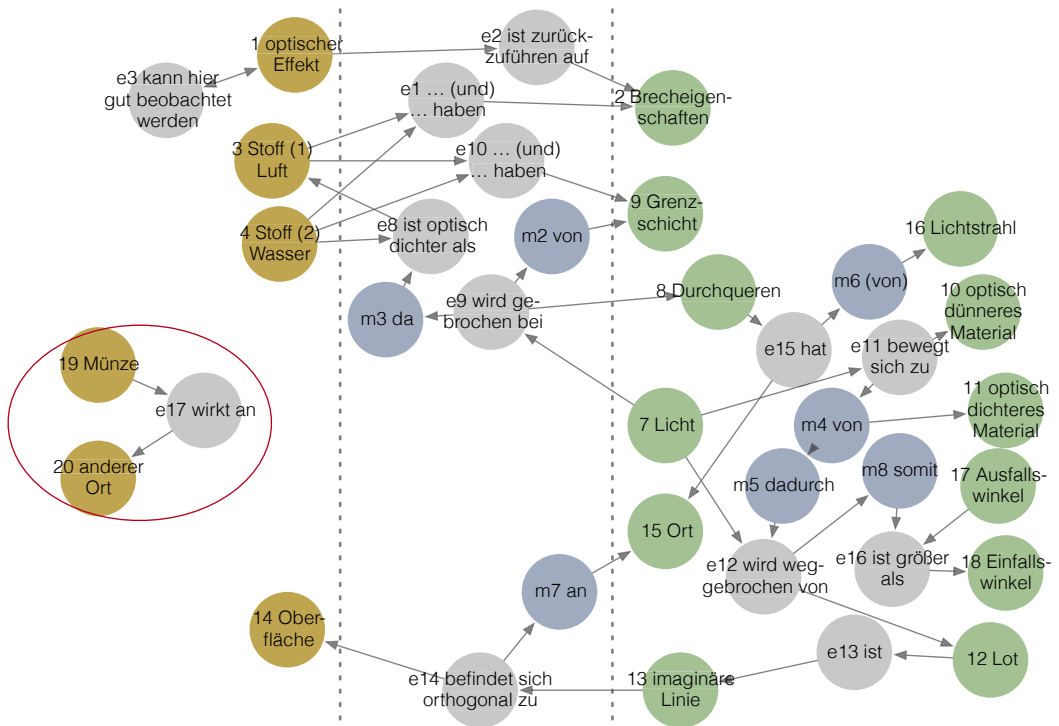


Concept Map zur Erklärung ao3-A (bereinigt)

ao3-B

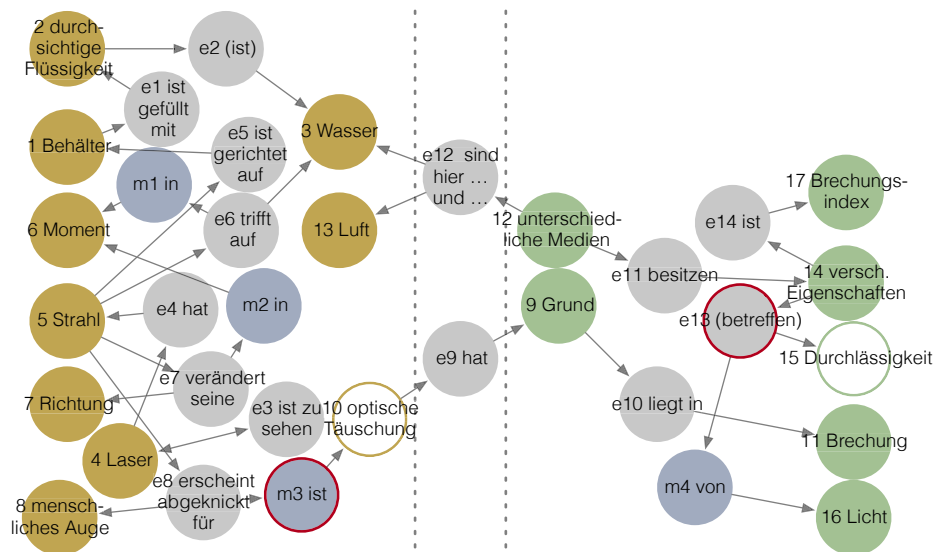


Concept Map zur Erklärung ao3-B

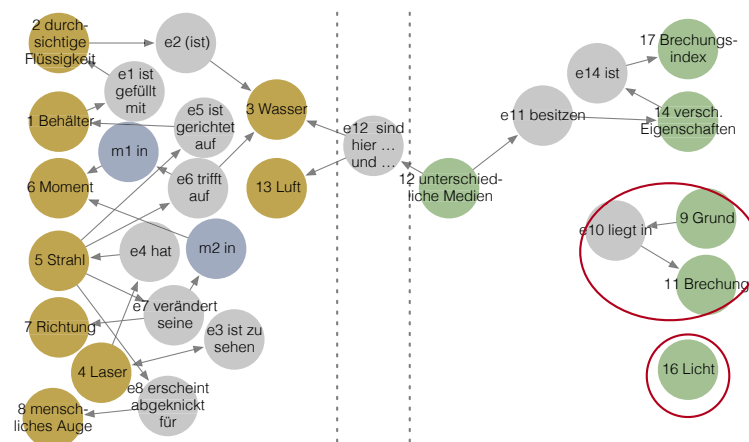


Concept Map zur Erklärung ao3-B (bereinigt)

ao4-A

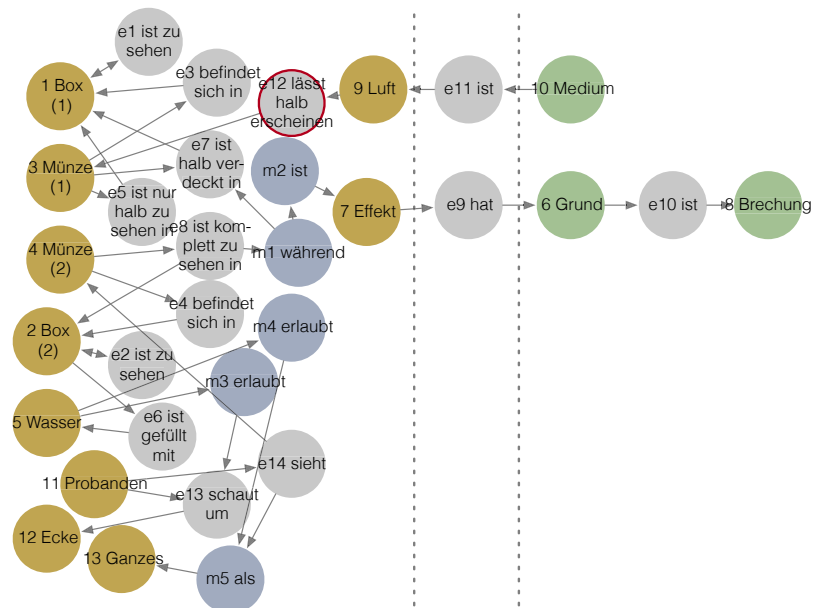


Concept Map zur Erklärung ao4-A

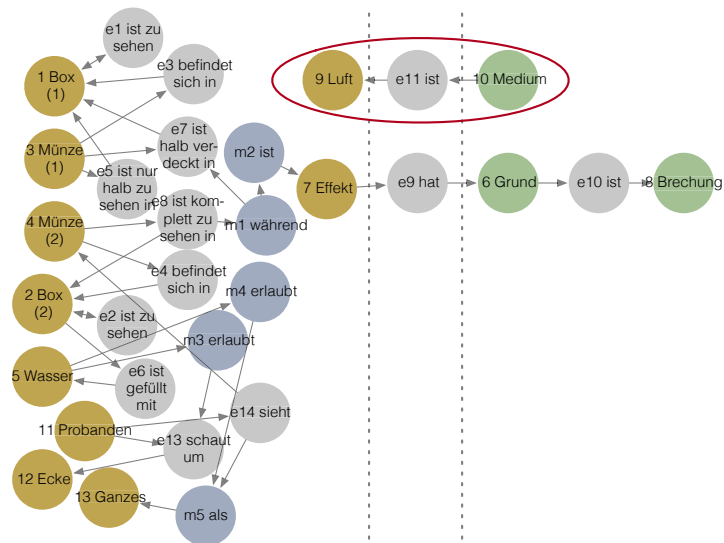


Concept Map zur Erklärung ao4-A (bereinigt)

ao4-B

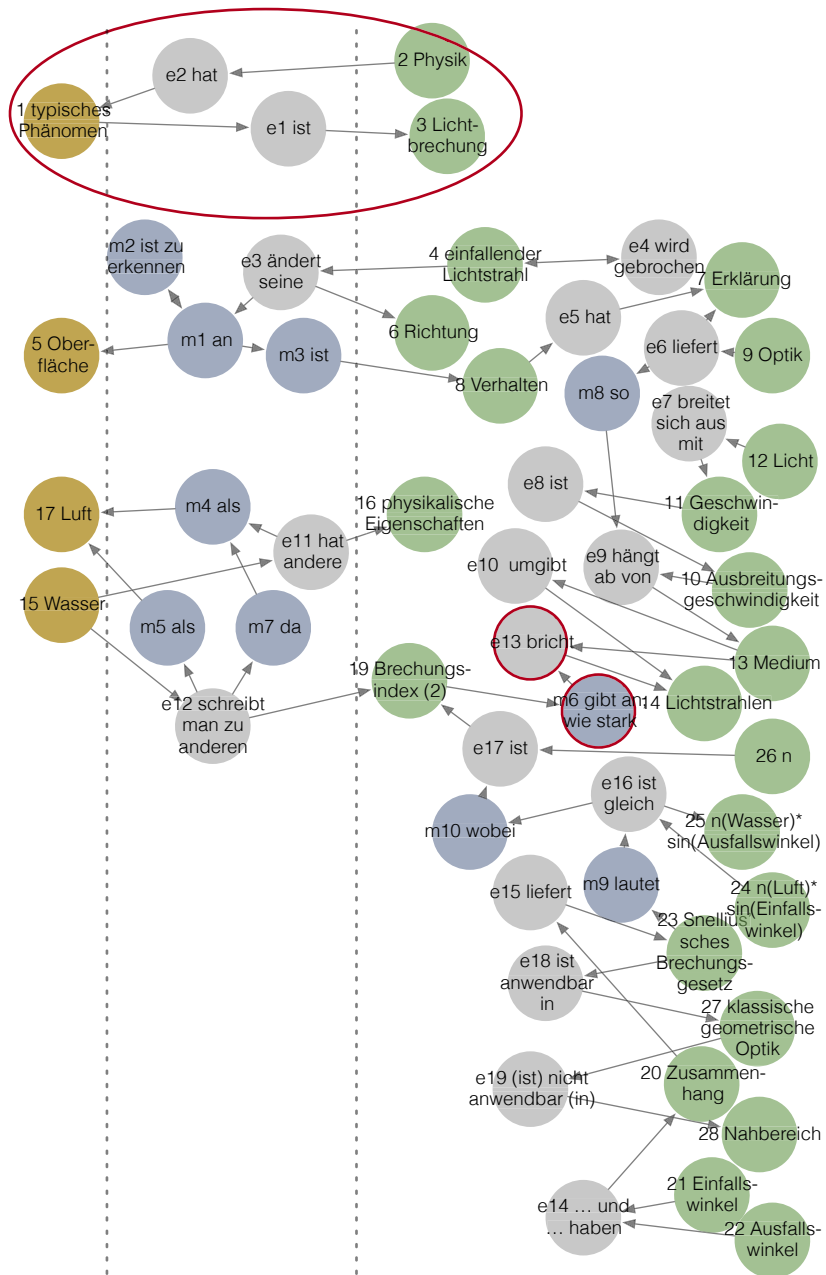


Concept Map zur Erklärung ao4-B

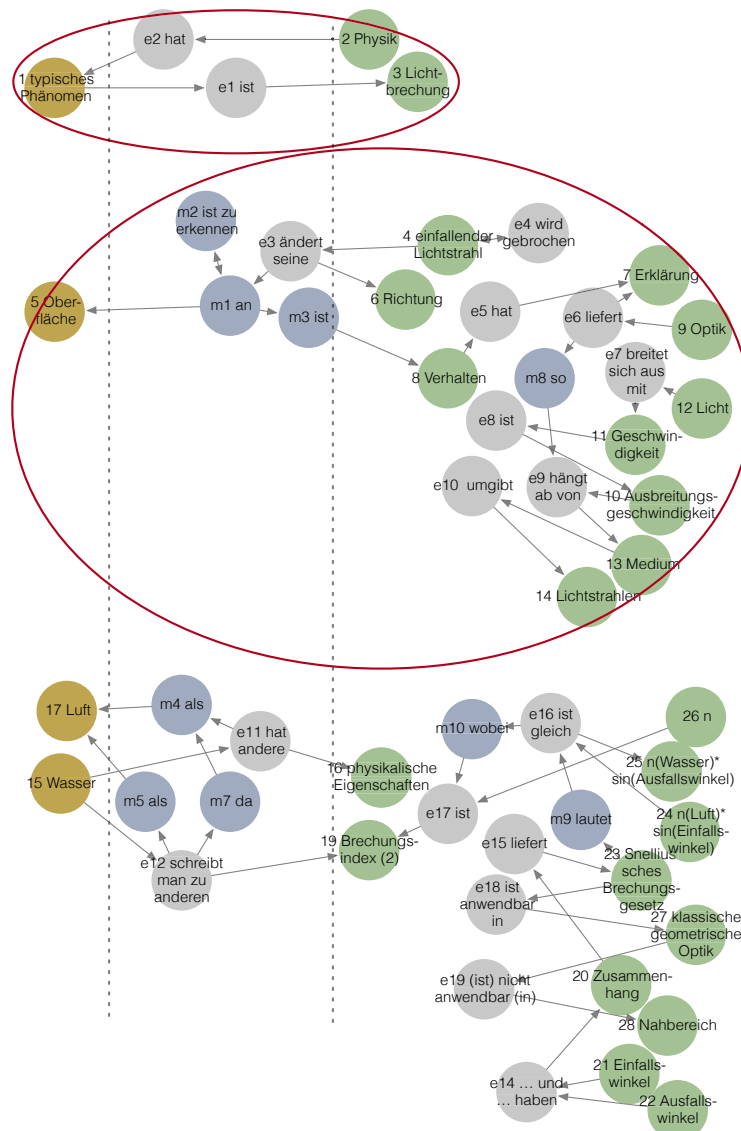


Concept Map zur Erklärung ao4-B (bereinigt)

bor-A

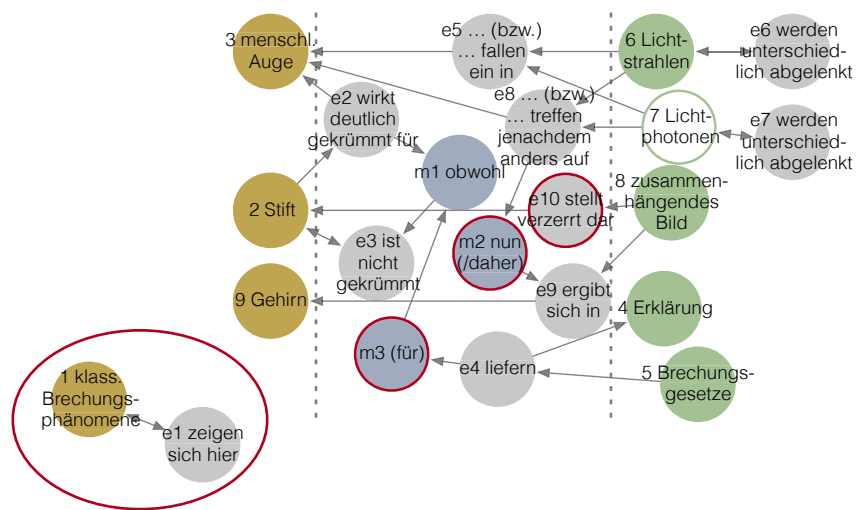


Concept Map zur Erklärung bor-A

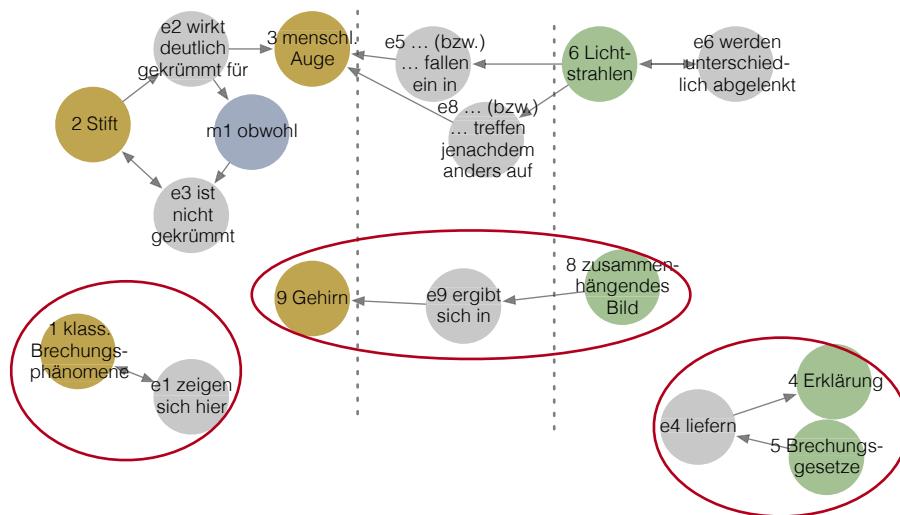


Concept Map zur Erklärung bor-A (bereinigt)

boi-C

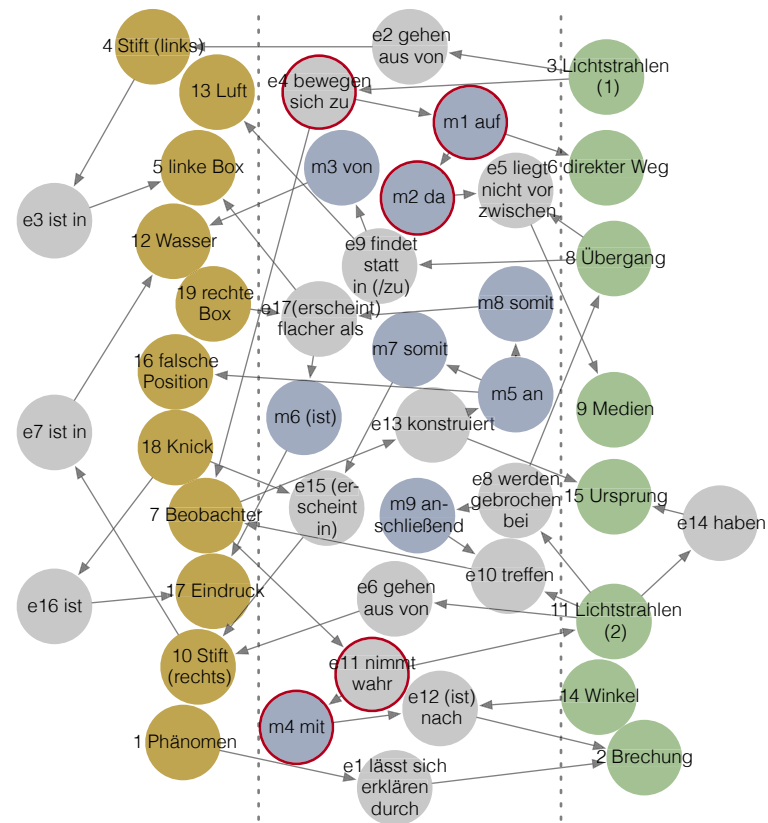


Concept Map zur Erklärung boi-C

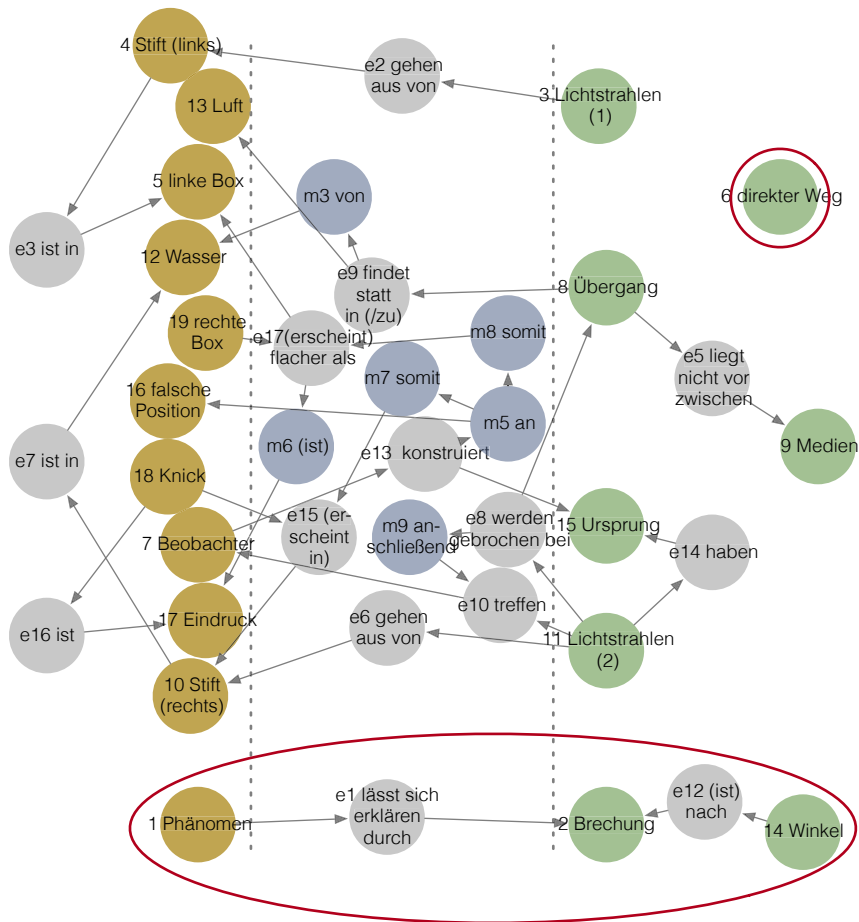


Concept Map zur Erklärung boi-C (bereinigt)

bo2-C

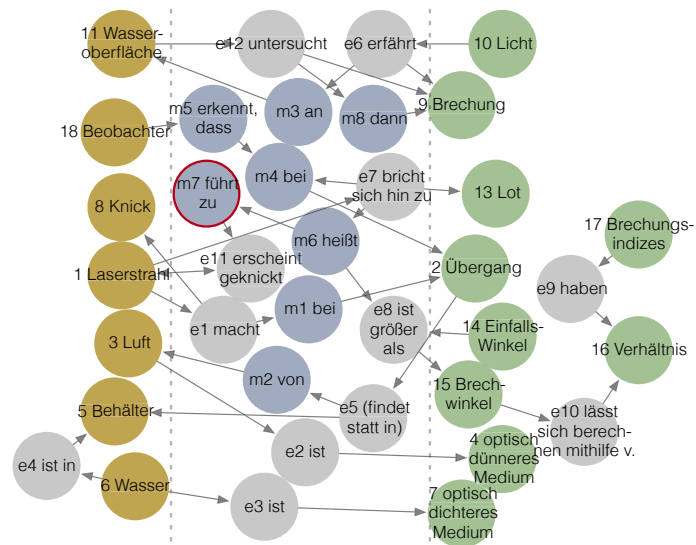


Concept Map zur Erklärung bo2-C

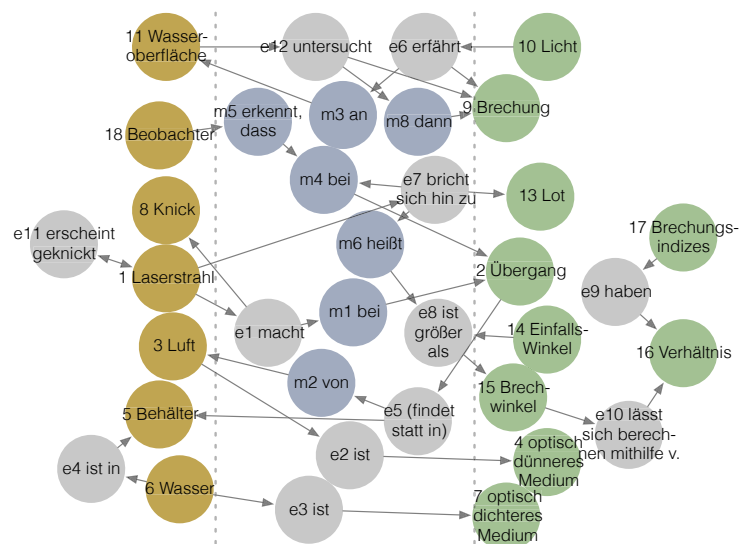


Concept Map zur Erklärung boz-C (bereinigt)

bo3-A

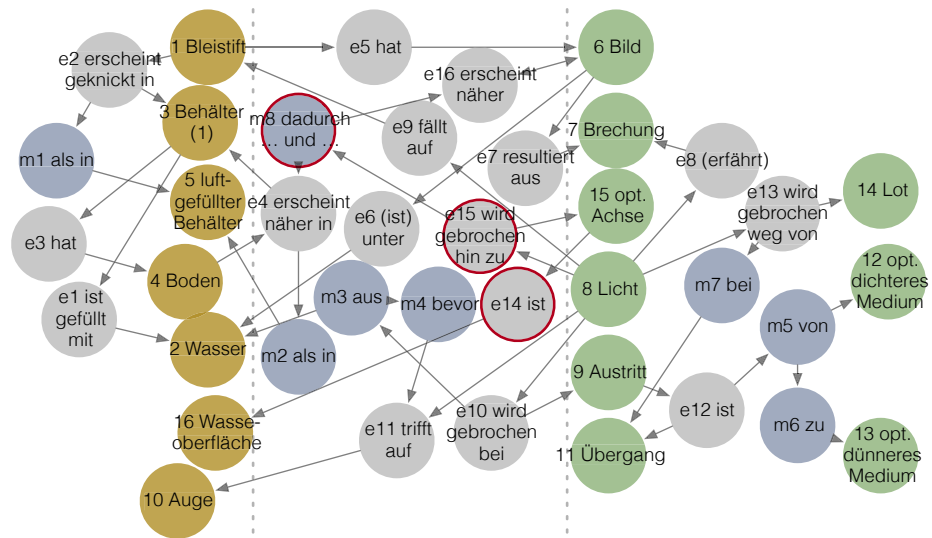


Concept Map zur Erklärung bo3-A

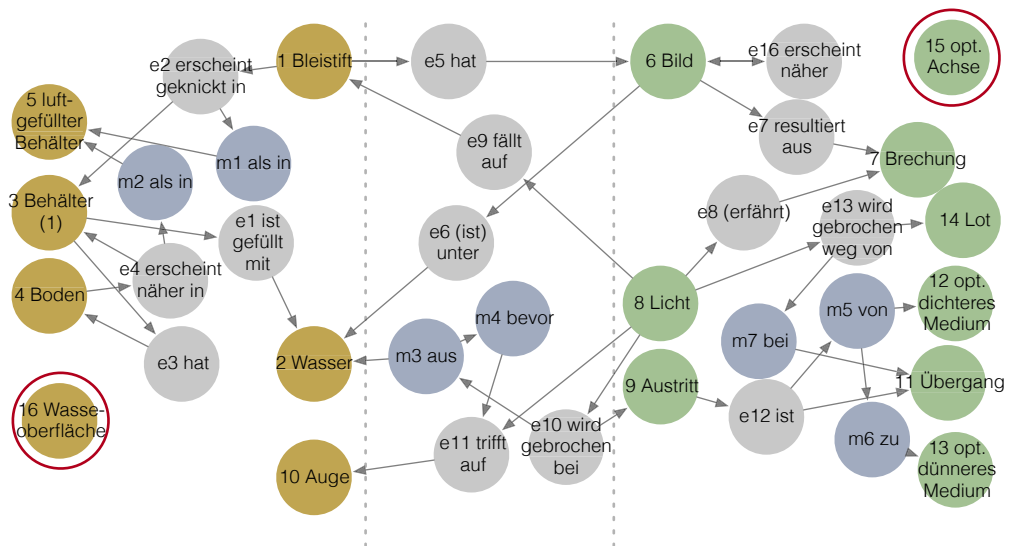


Concept Map zur Erklärung bo3-A (bereinigt)

bo3-C

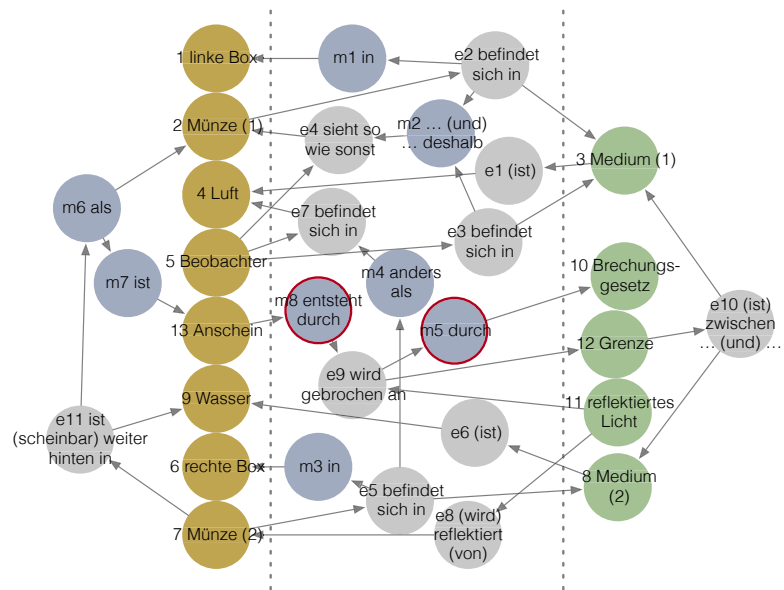


Concept Map zur Erklärung bo3-C

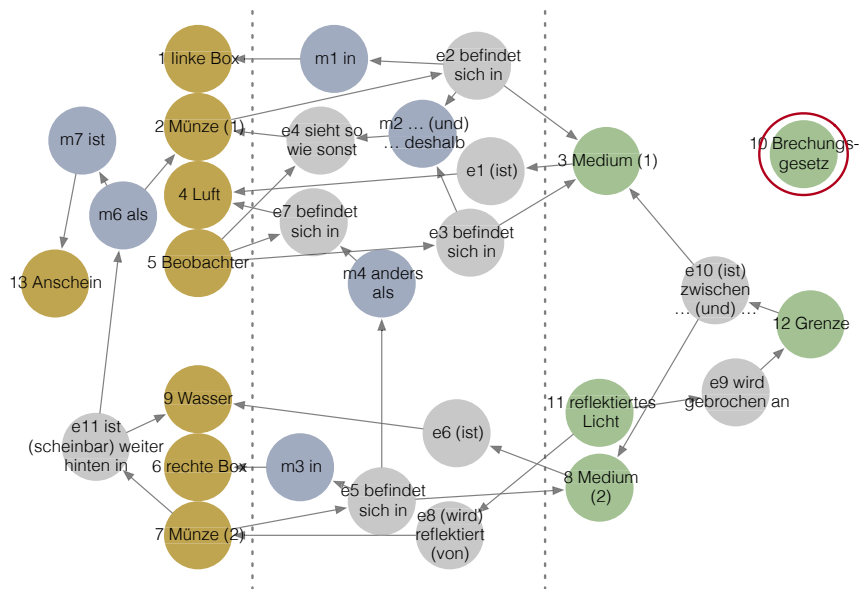


Concept Map zur Erklärung bo3-C (bereinigt)

cor-B

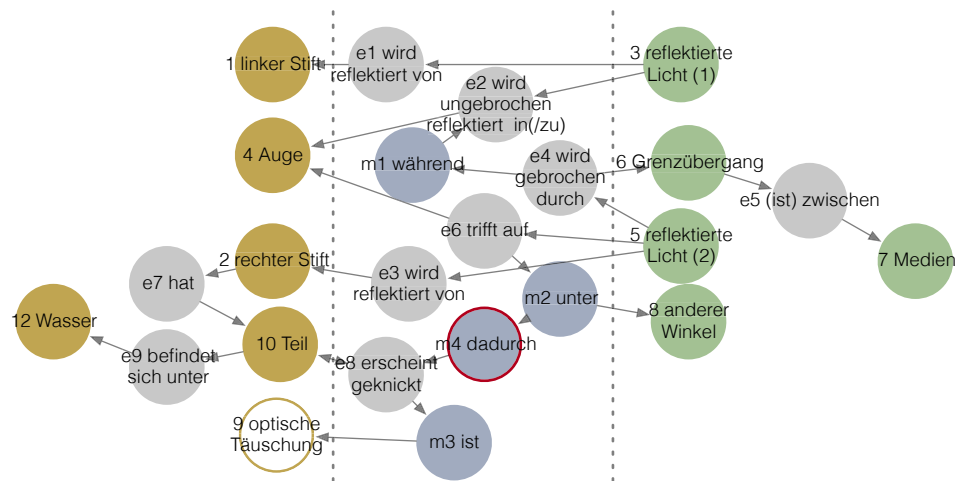


Concept Map zur Erklärung cor-B

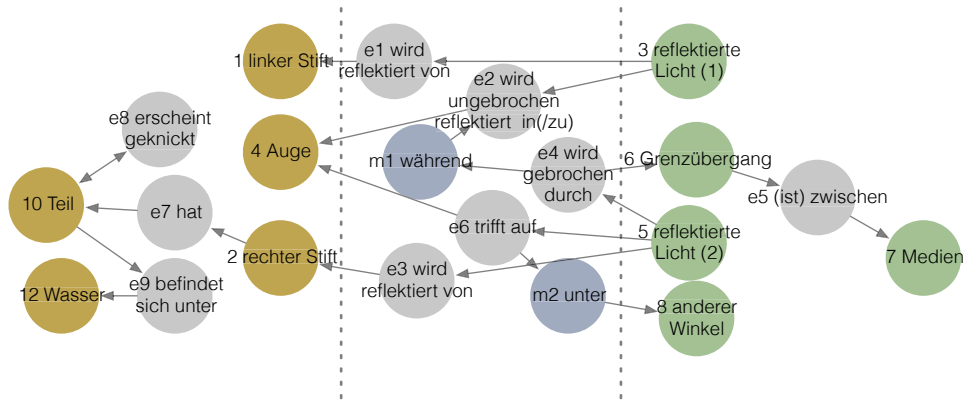


Concept Map zur Erklärung cor-B (bereinigt)

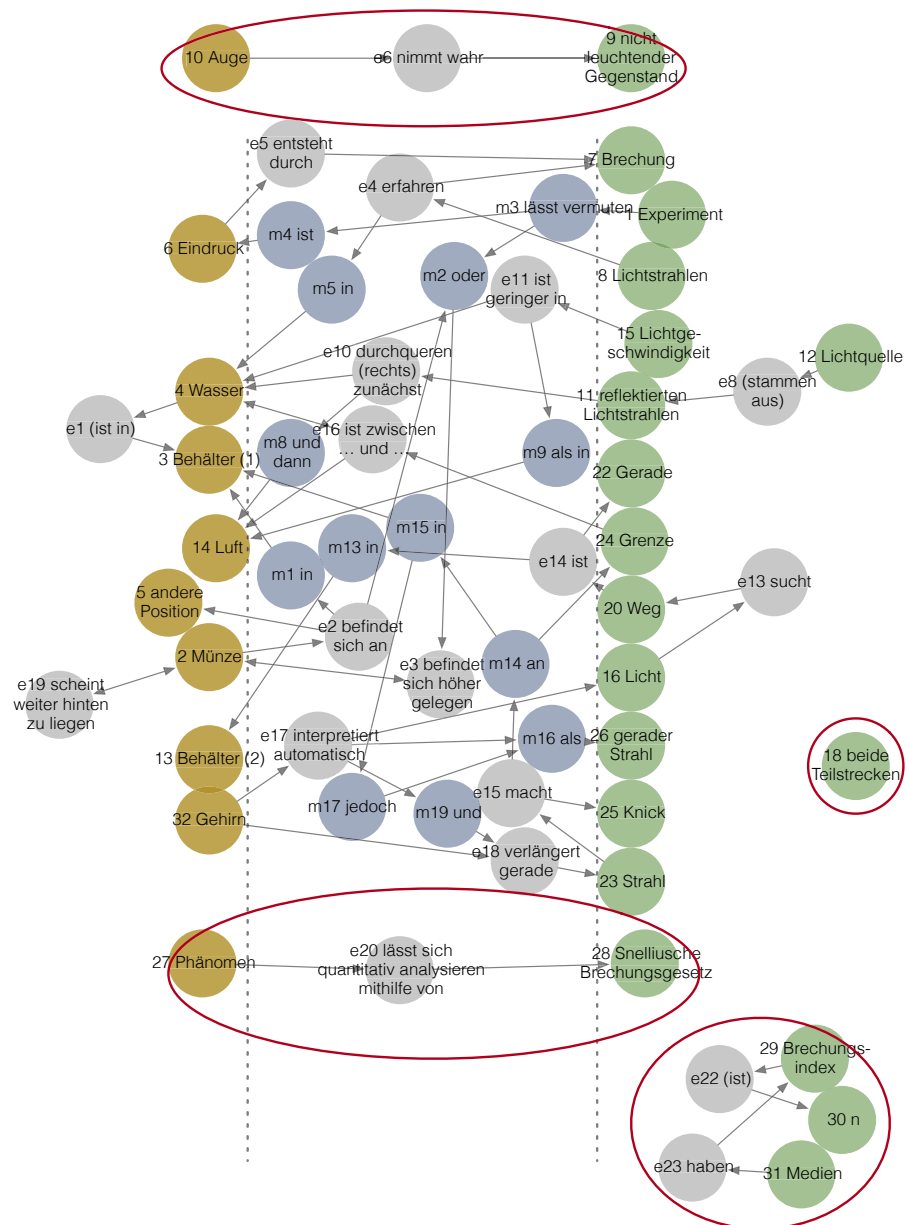
cor-C



Concept Map zur Erklärung cor-C

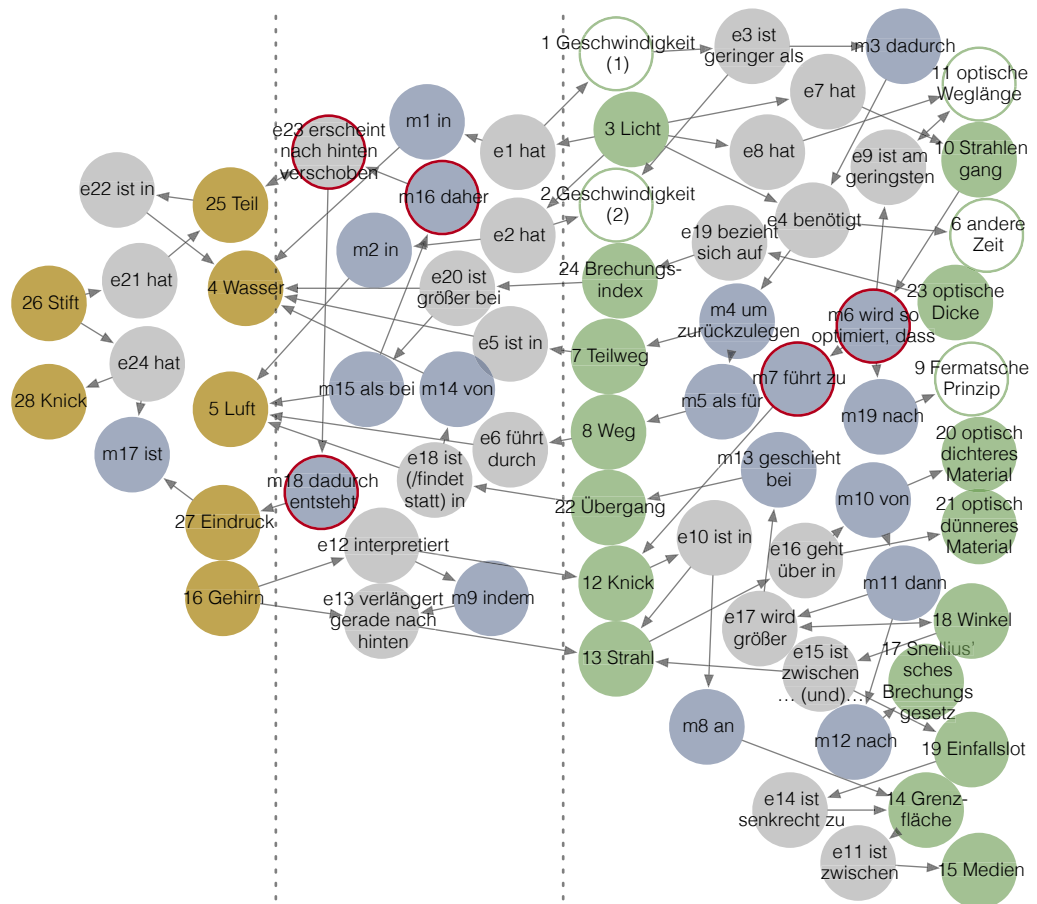


Concept Map zur Erklärung cor-C (bereinigt)

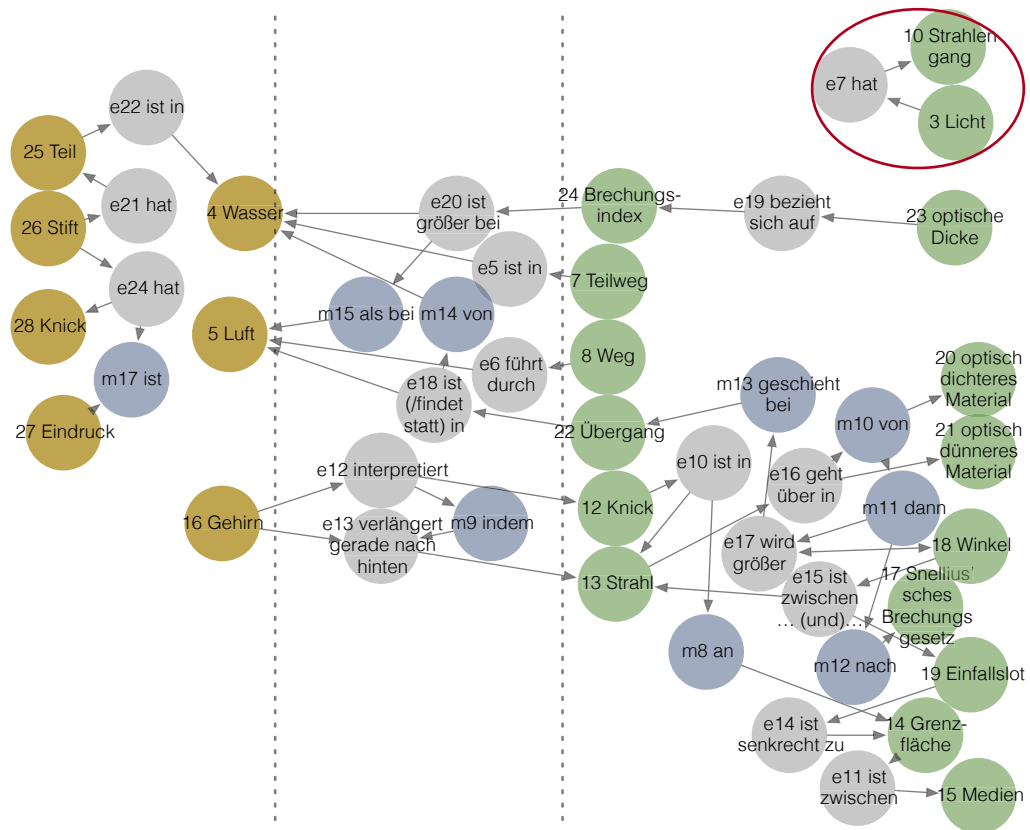


Concept Map zur Erklärung co2-B (bereinigt)

co2-C



Concept Map zur Erklärung co2-C

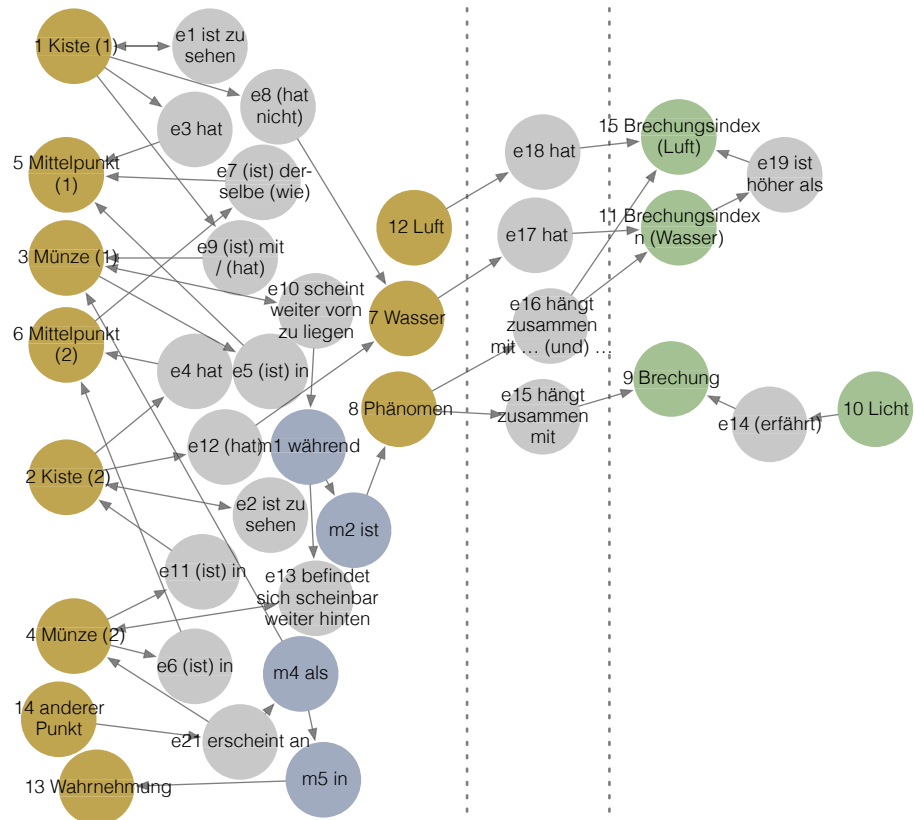


Concept Map zur Erklärung co2-C (bereinigt)

co3-B

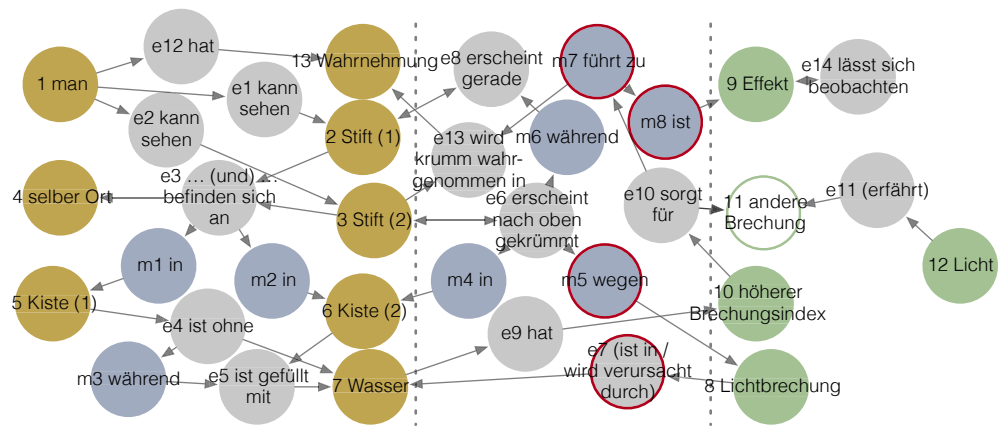


Concept Map zur Erklärung co3-B

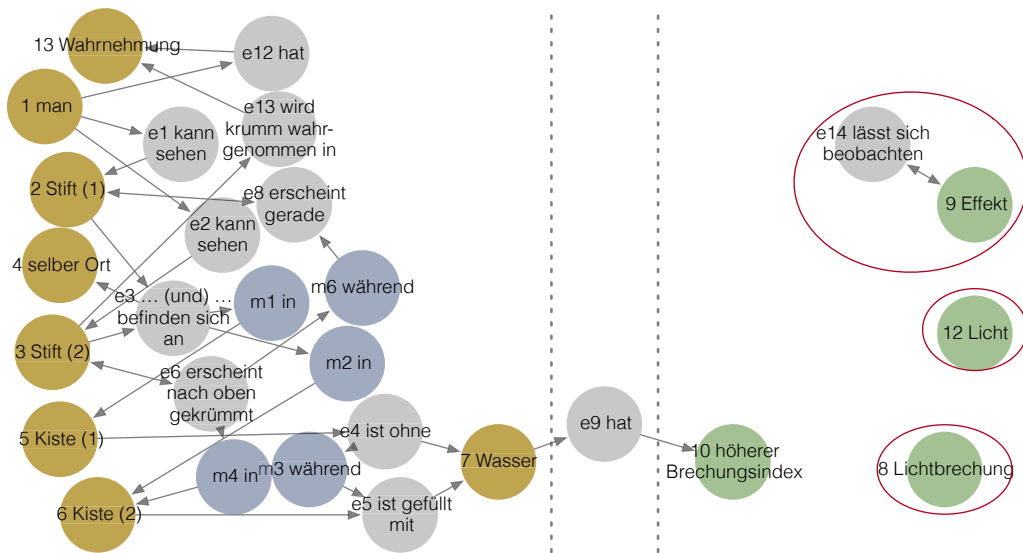


Concept Map zur Erklärung co3-B (bereinigt)

co3-C

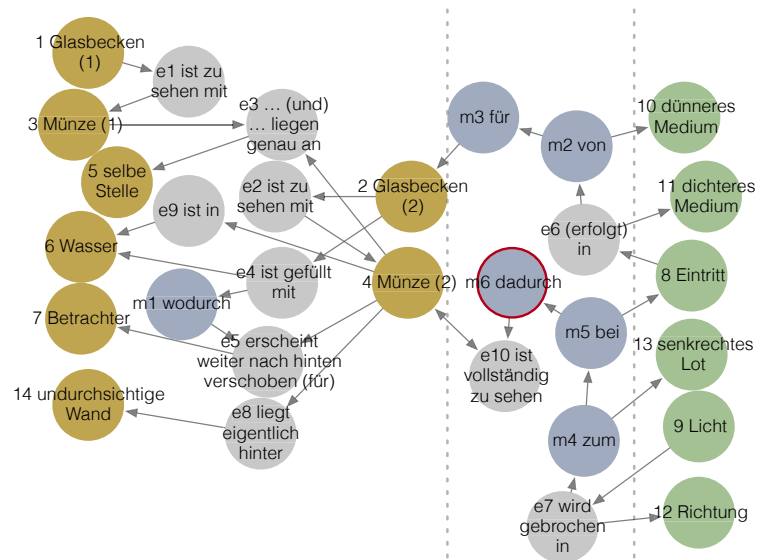


Concept Map zur Erklärung co3-C

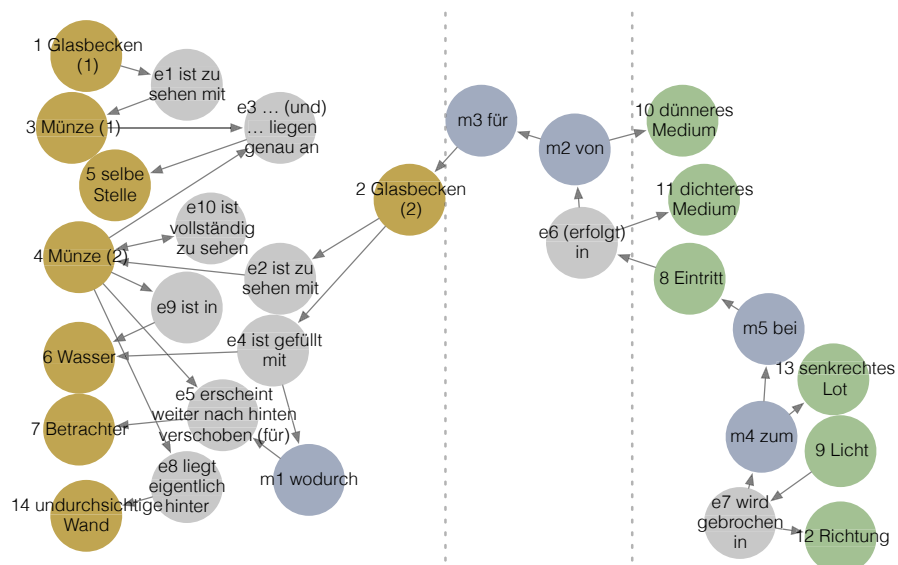


Concept Map zur Erklärung co3-C (bereinigt)

co4-B

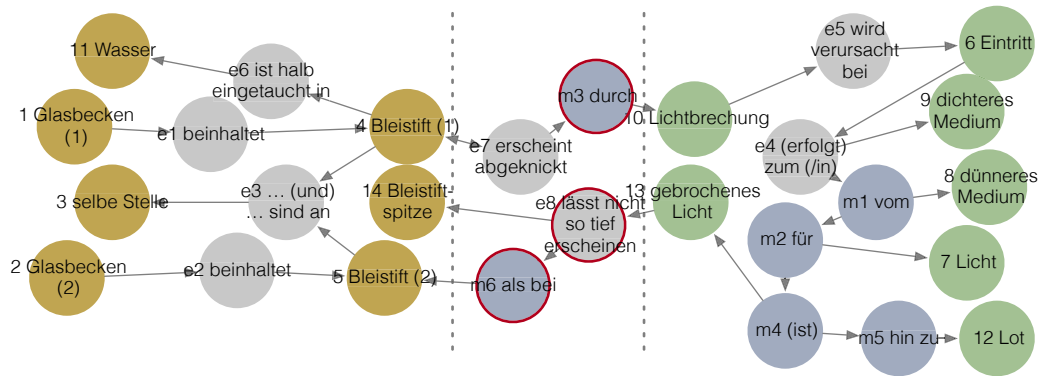


Concept Map zur Erklärung co4-B

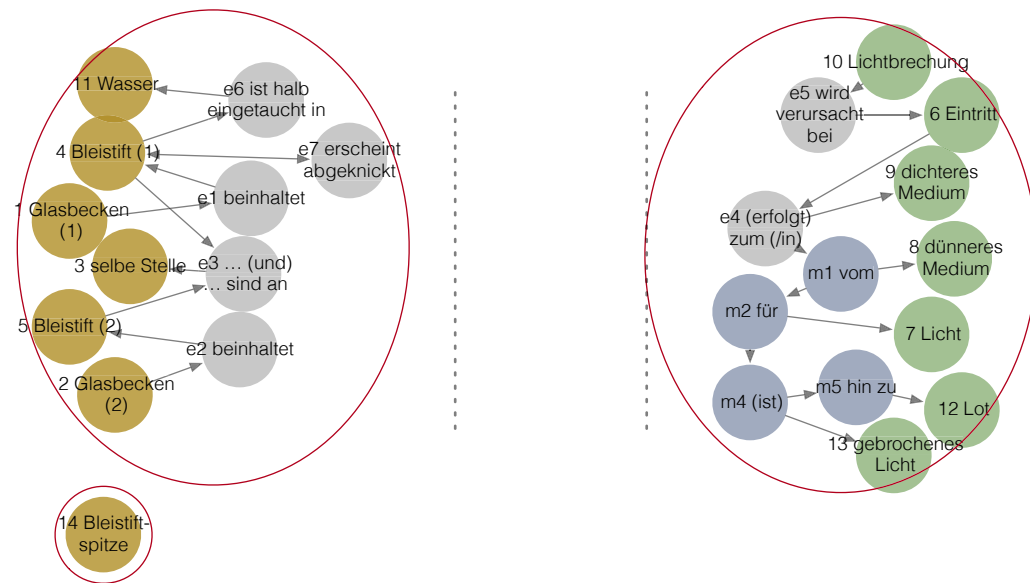


Concept Map zur Erklärung co4-B (bereinigt)

co4-C

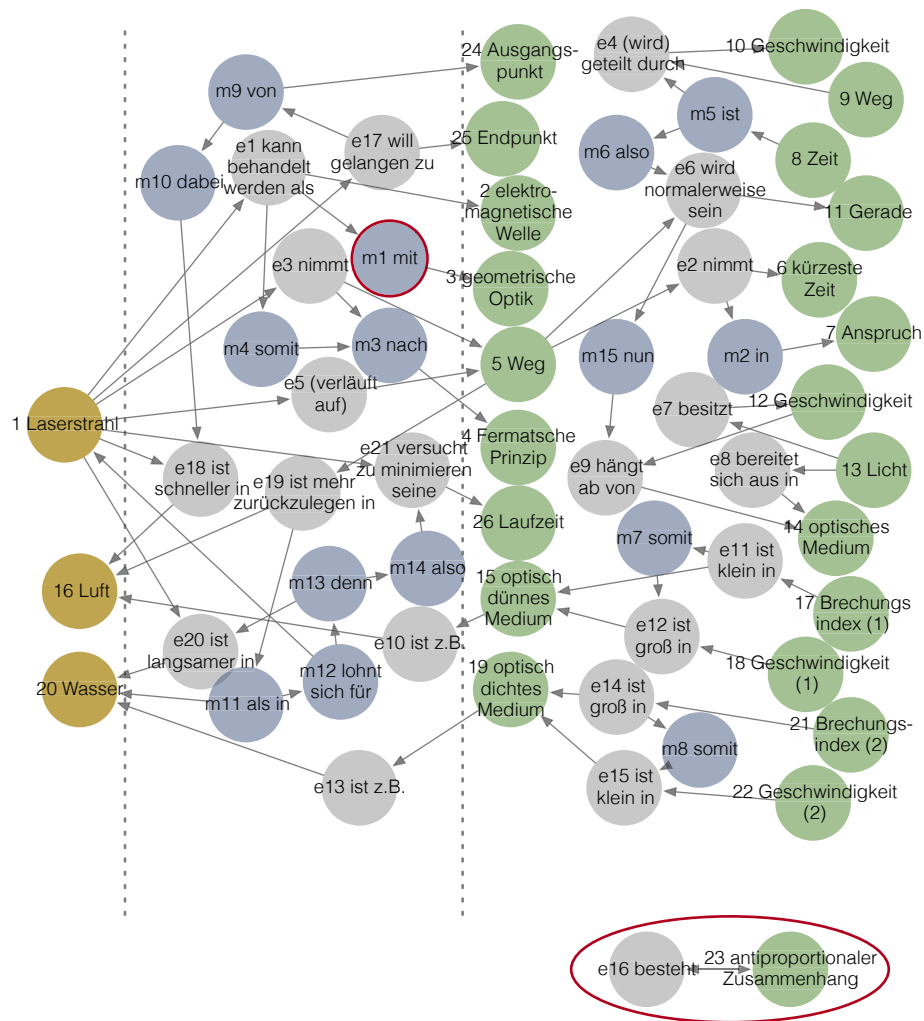


Concept Map zur Erklärung co4-C

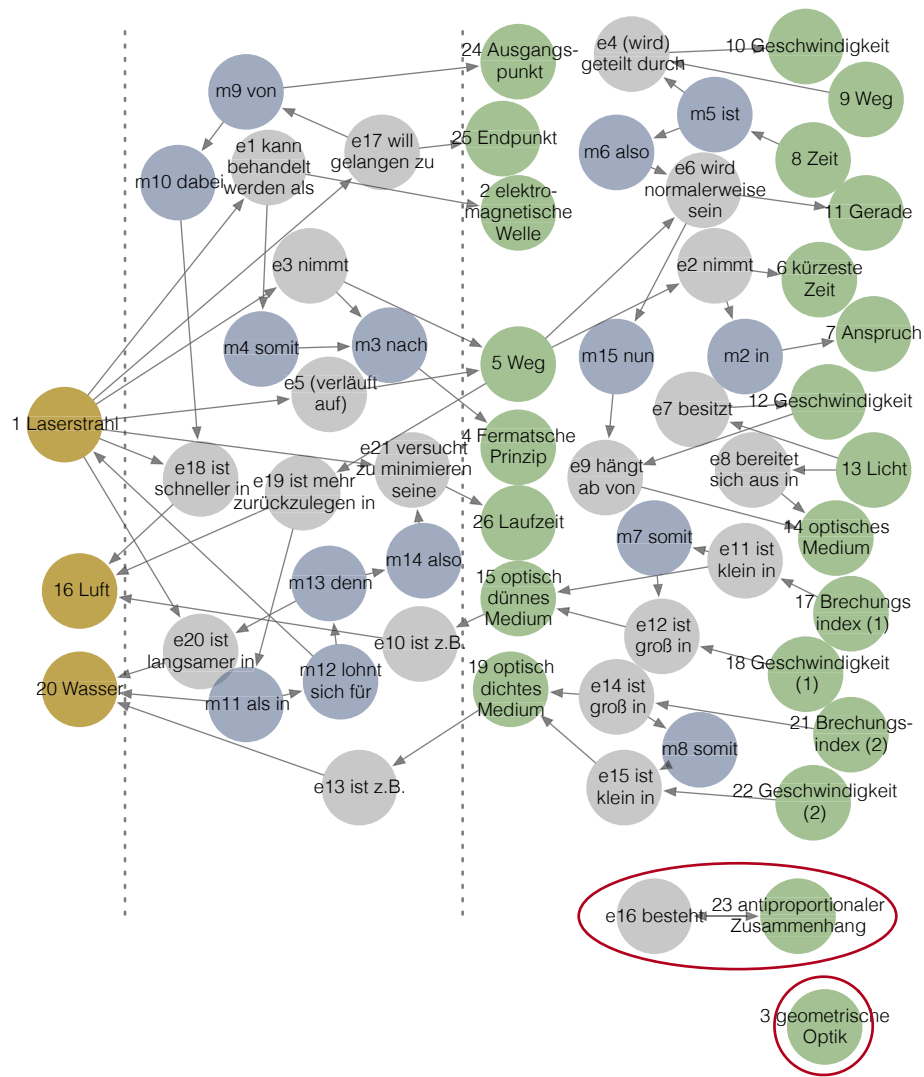


Concept Map zur Erklärung co4-C (bereinigt)

doi-A

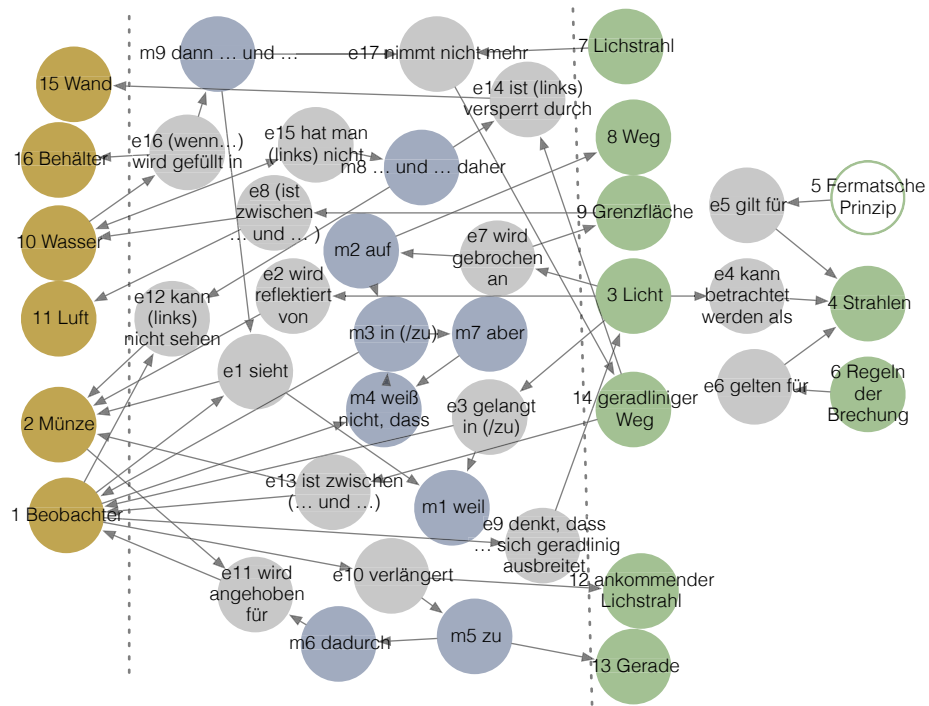


Concept Map zur Erklärung doi-A



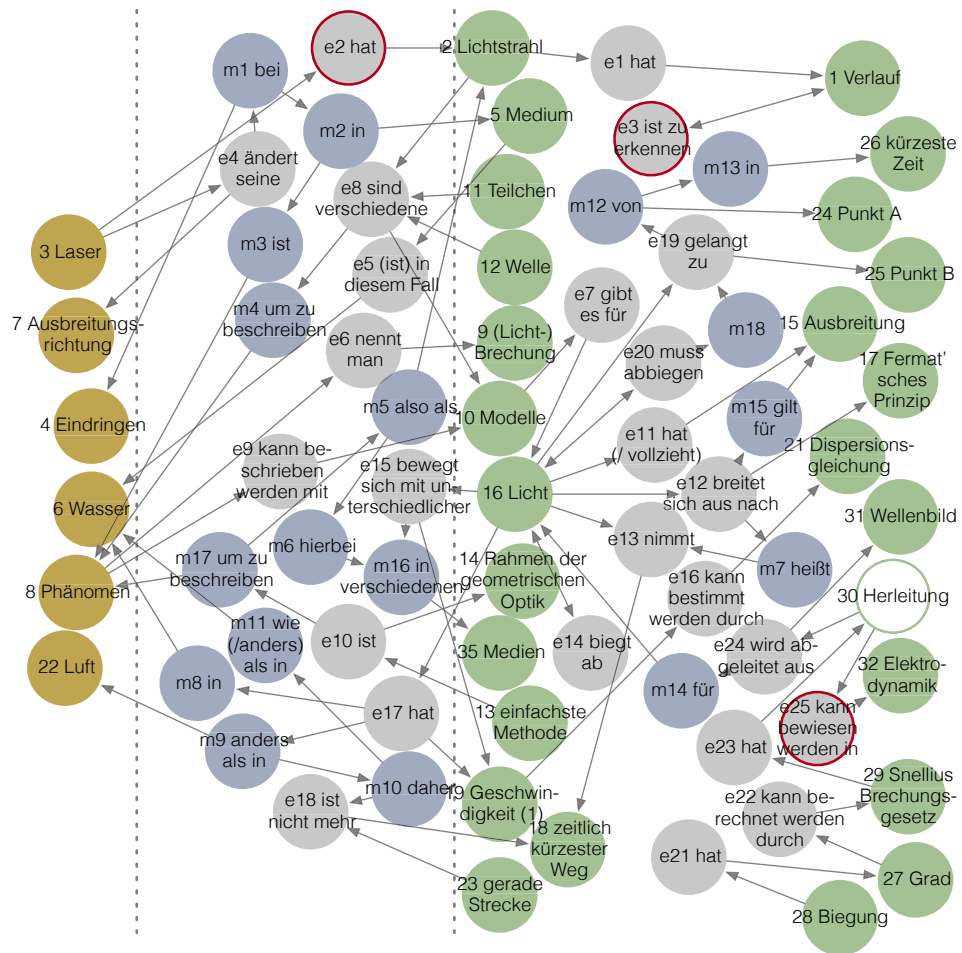
Concept Map zur Erklärung dor-A (bereinigt)

doi-B

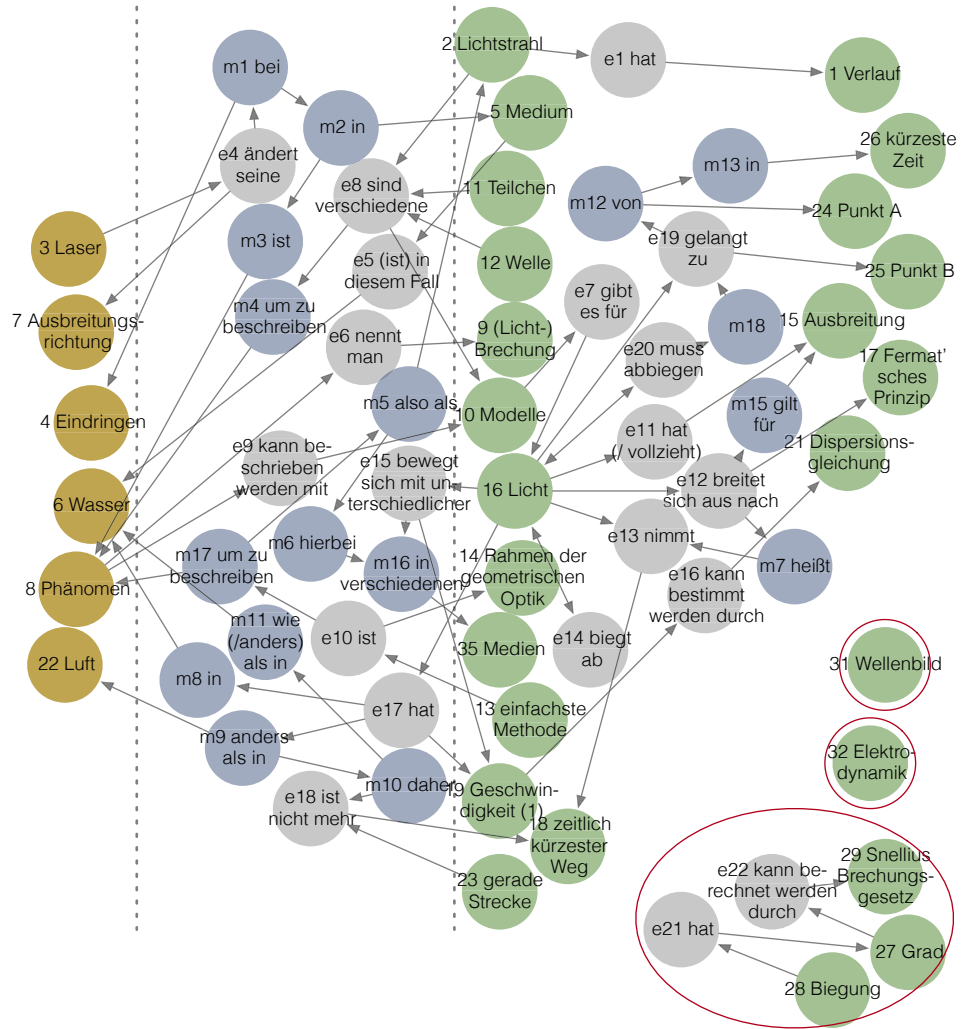


Concept Map zur Erklärung doi-B

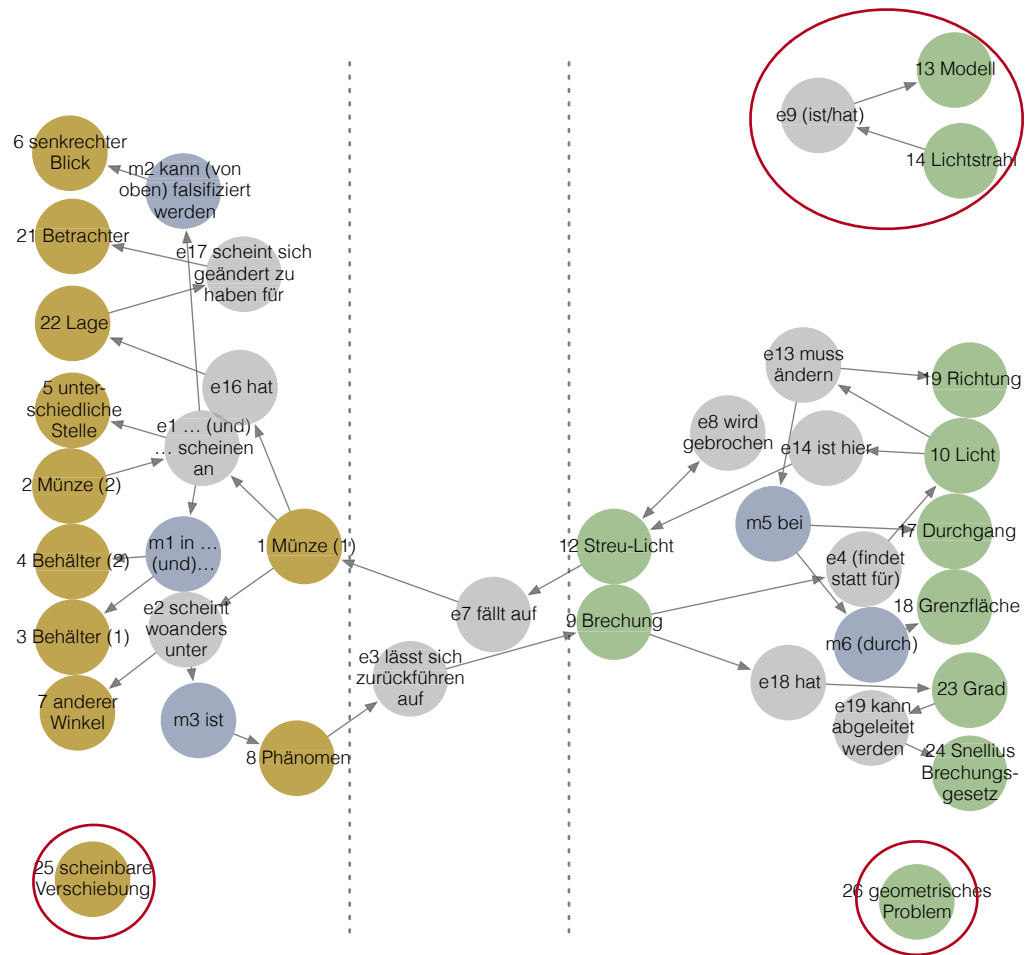
do2-A



Concept Map zur Erklärung do2-A

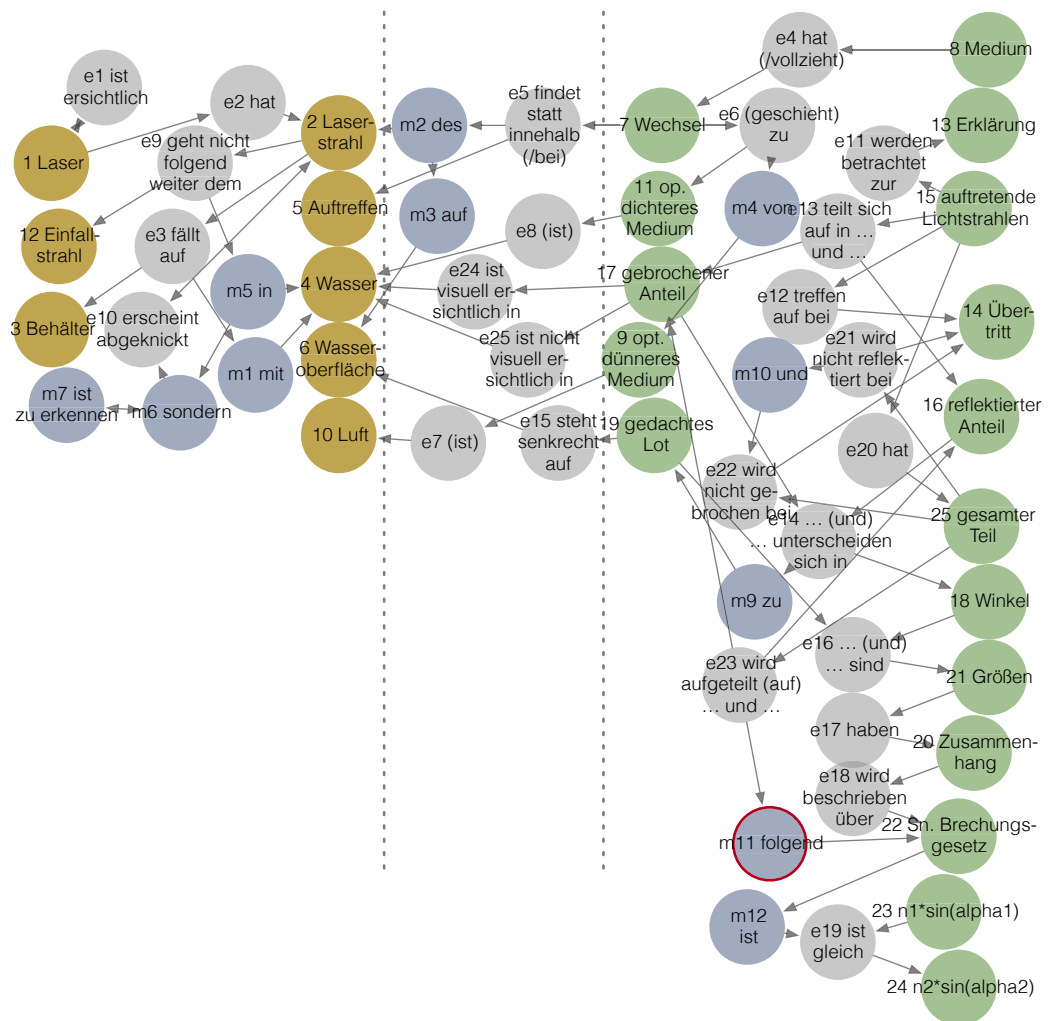


Concept Map zur Erklärung doz-A (bereinigt)



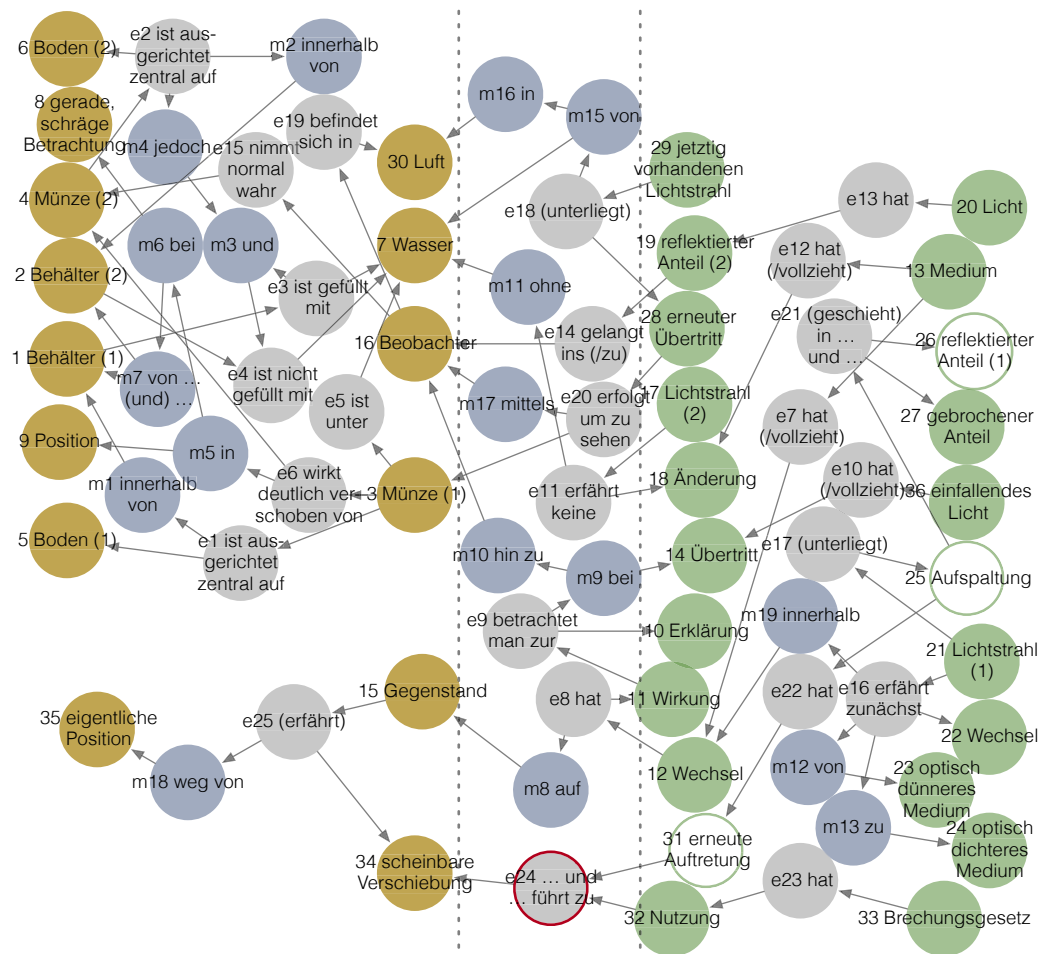
Concept Map zur Erklärung doz-B (bereinigt)

do3-A

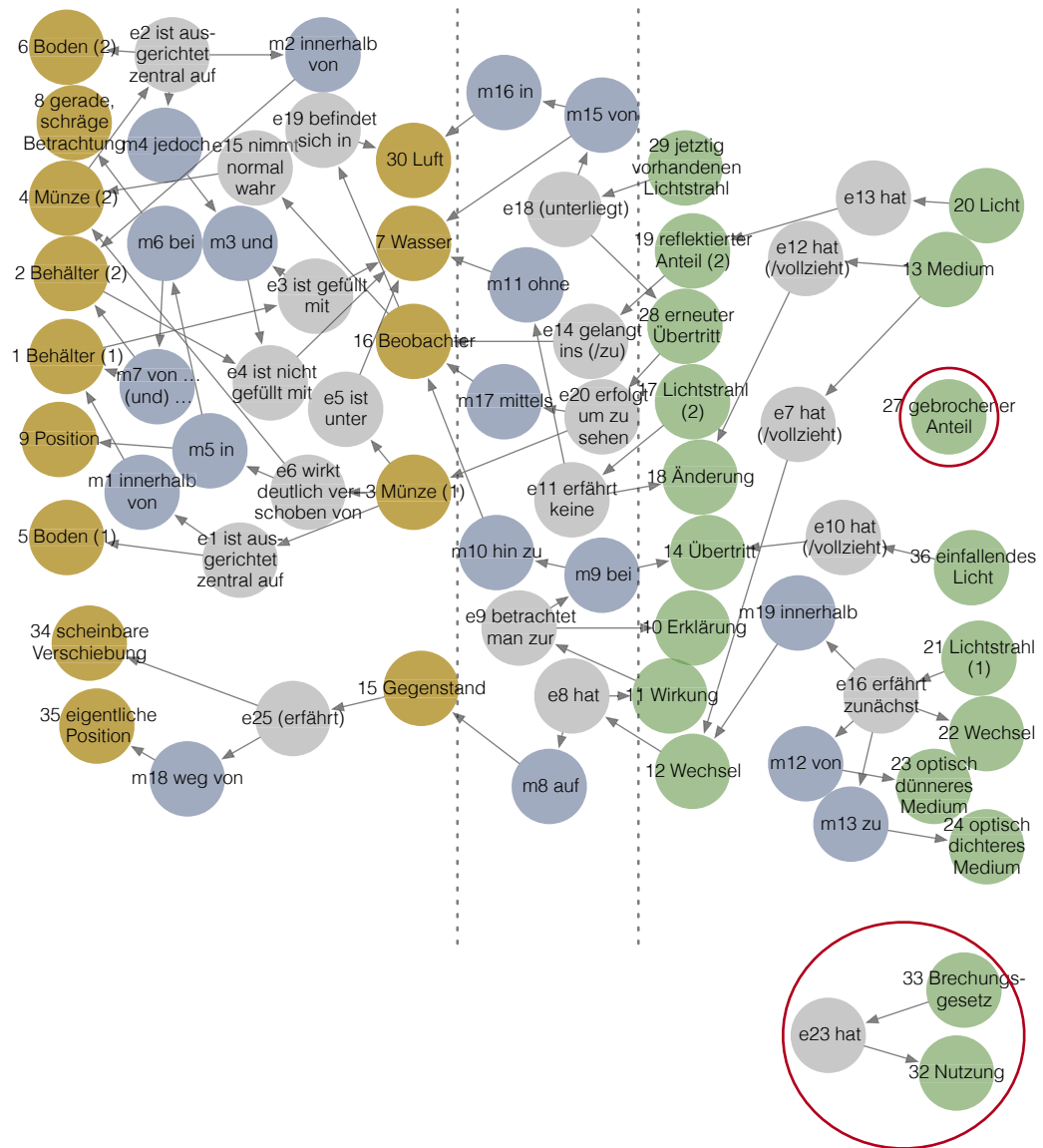


Concept Map zur Erklärung do3-A

do3-B



Concept Map zur Erklärung do3-B



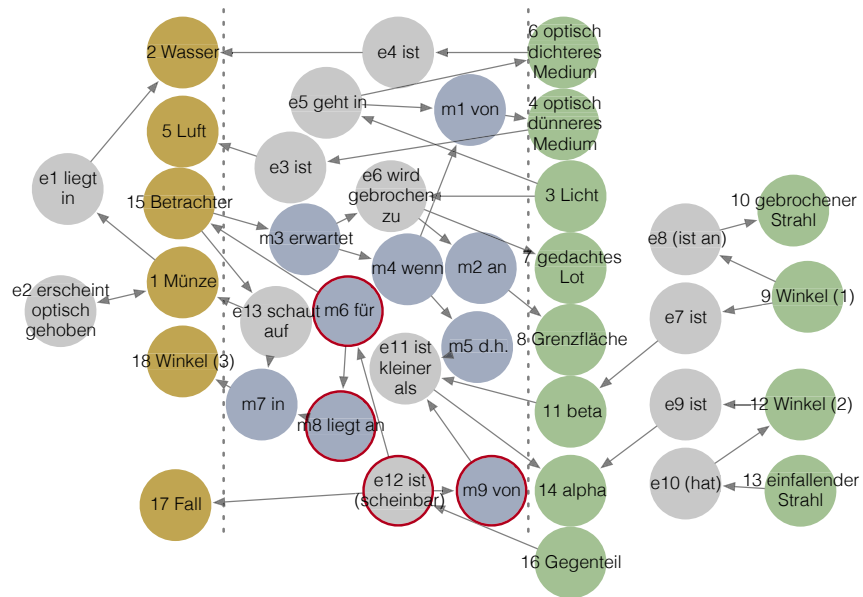
Concept Map zur Erklärung do3-B (bereinigt)

do4-A

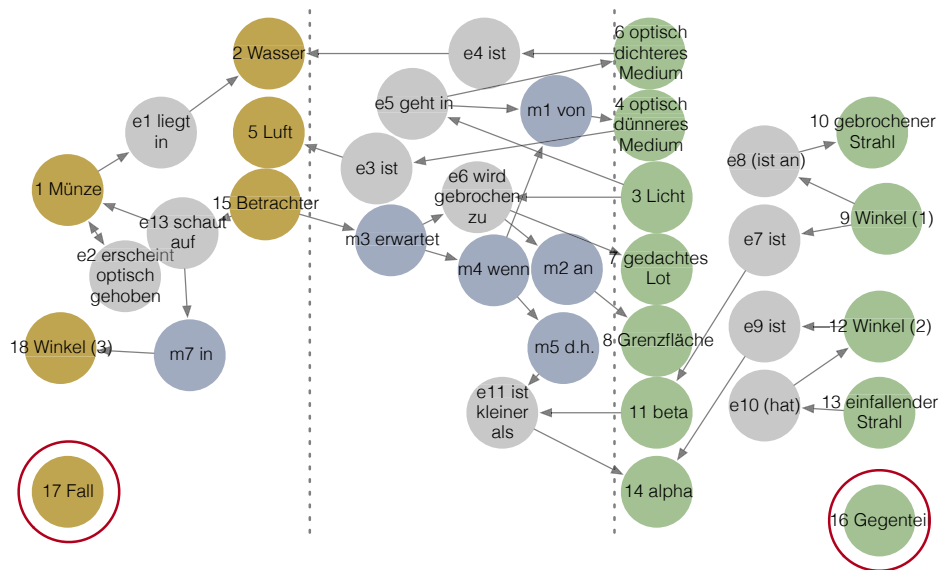


Concept Map zur Erklärung do4-A

do4-B

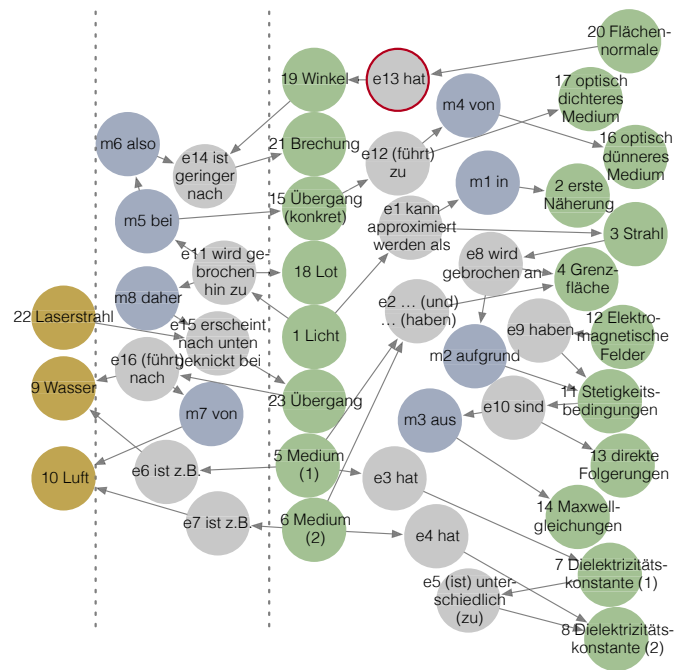


Concept Map zur Erklärung do4-B

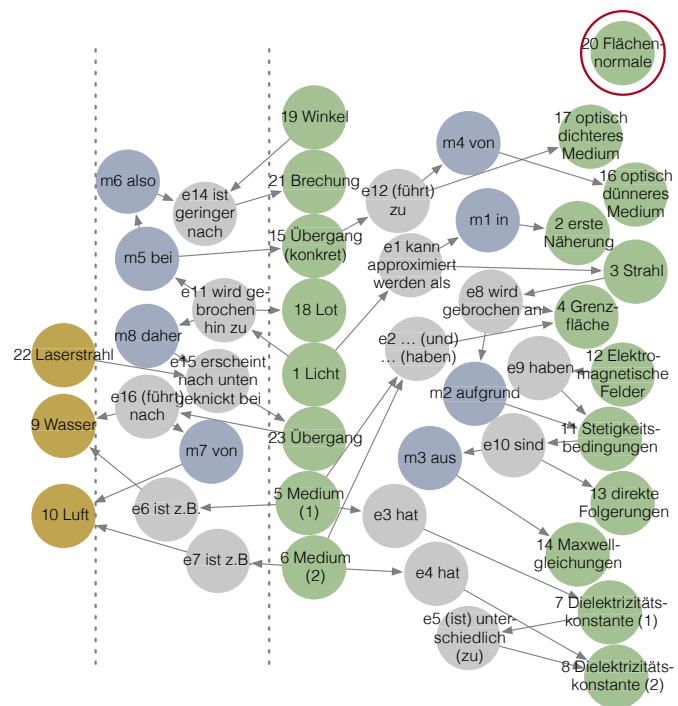


Concept Map zur Erklärung do4-B (bereinigt)

eoI-A

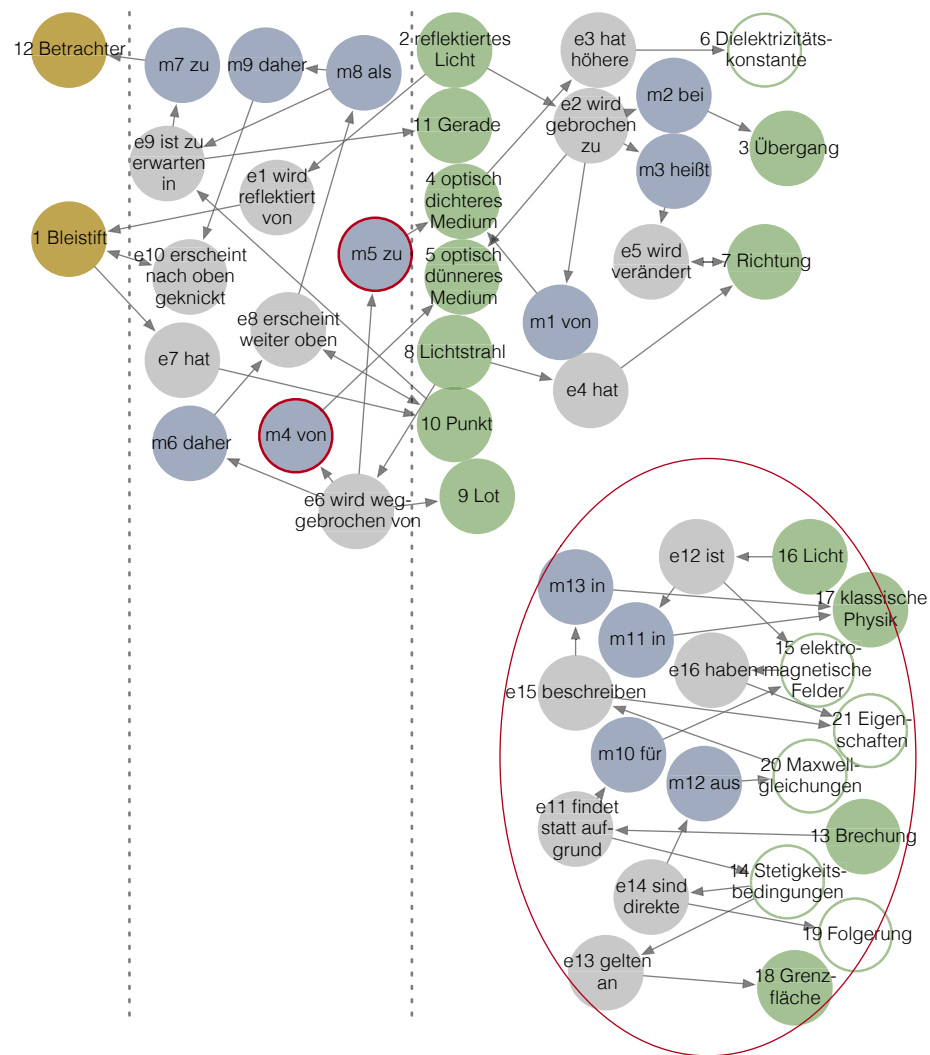


Concept Map zur Erklärung eoi-A

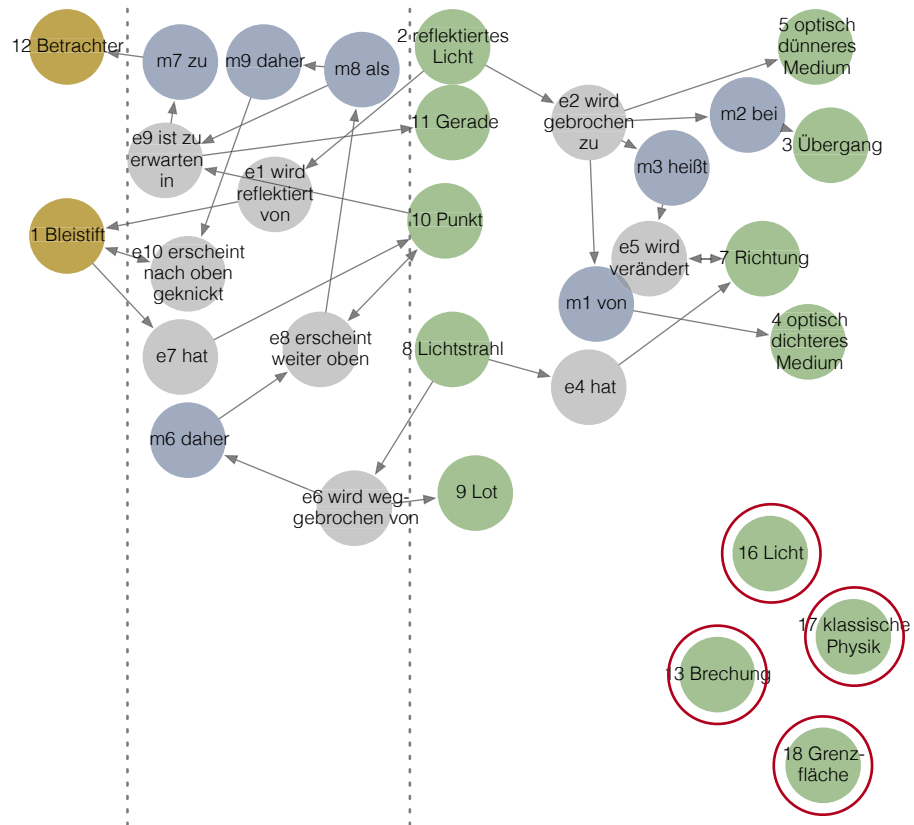


Concept Map zur Erklärung eoi-A (bereinigt)

eor-C

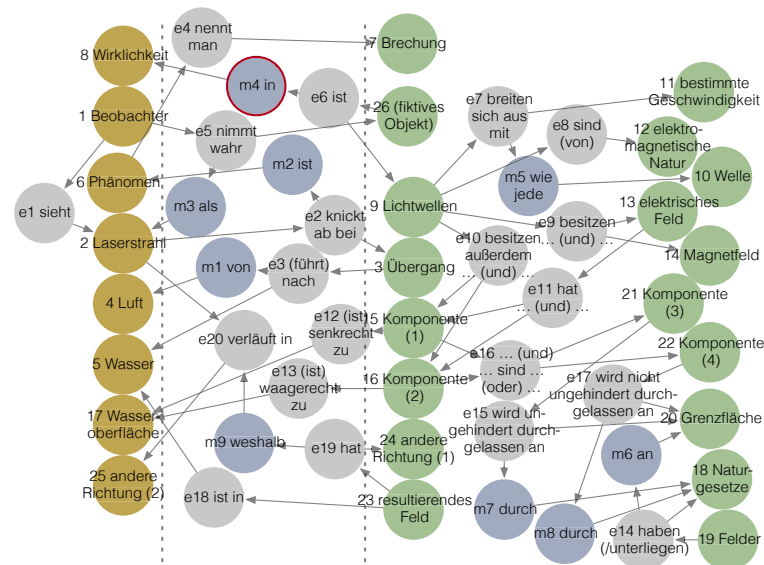


Concept Map zur Erklärung eor-C

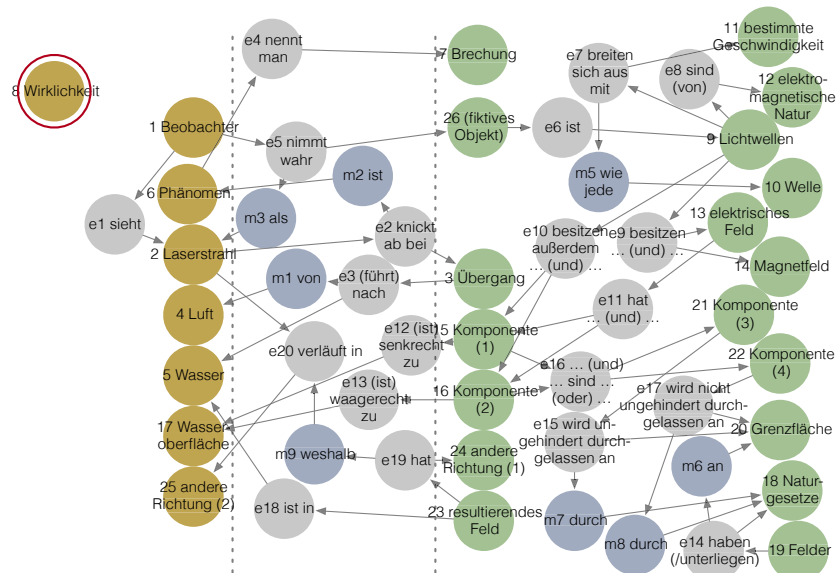


Concept Map zur Erklärung eor-C (bereinigt)

eo2-A

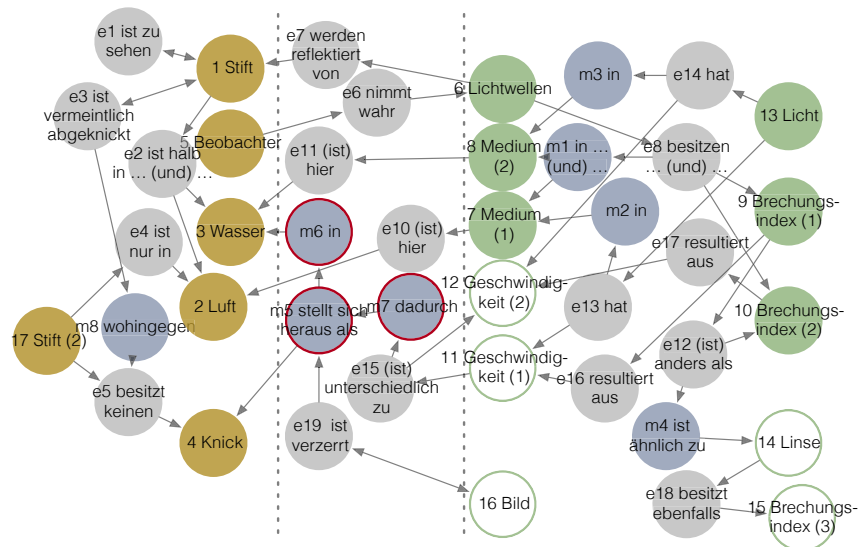


Concept Map zur Erklärung eo2-A

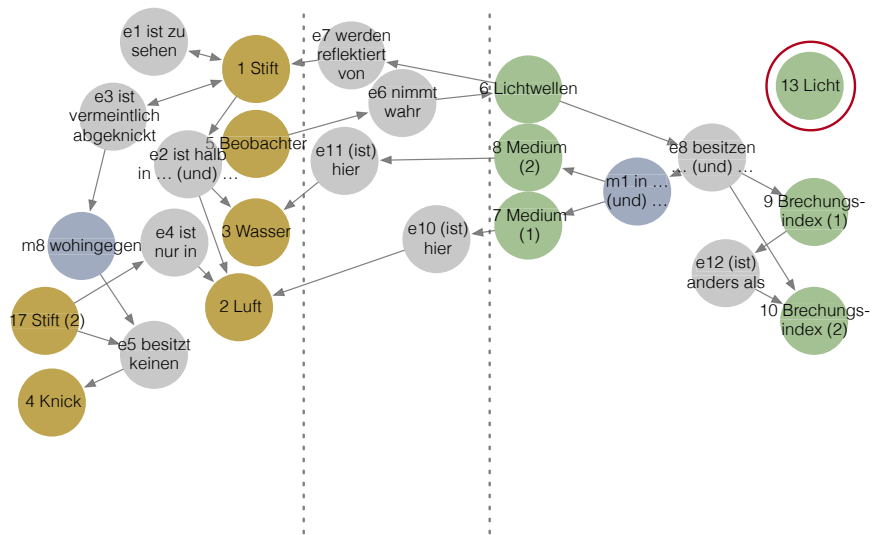


Concept Map zur Erklärung eo2-A (bereinigt)

eo2-C

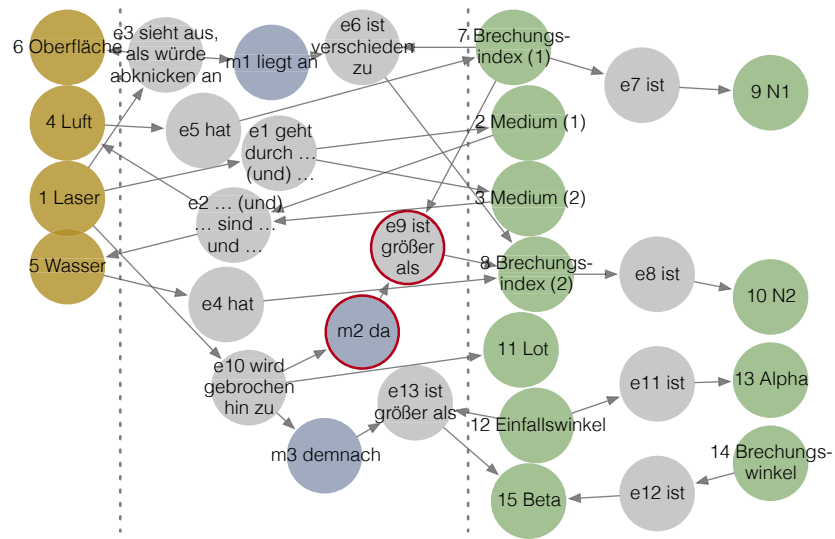


Concept Map zur Erklärung eo2-C

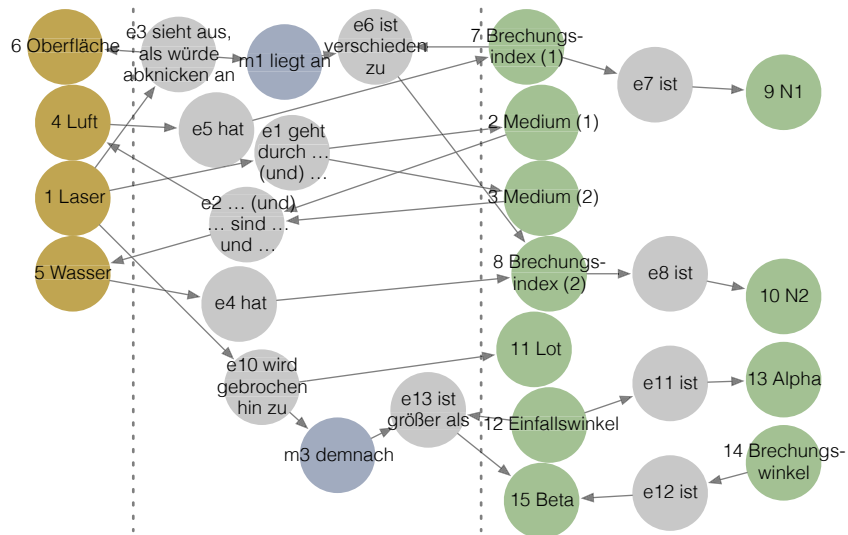


Concept Map zur Erklärung eo2-C (bereinigt)

eo4-A

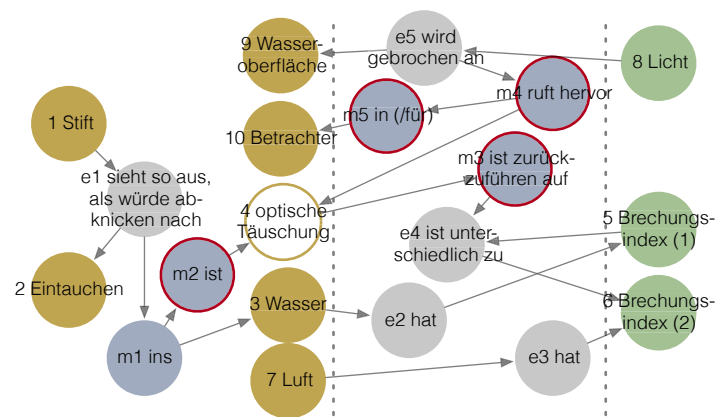


Concept Map zur Erklärung eo4-A

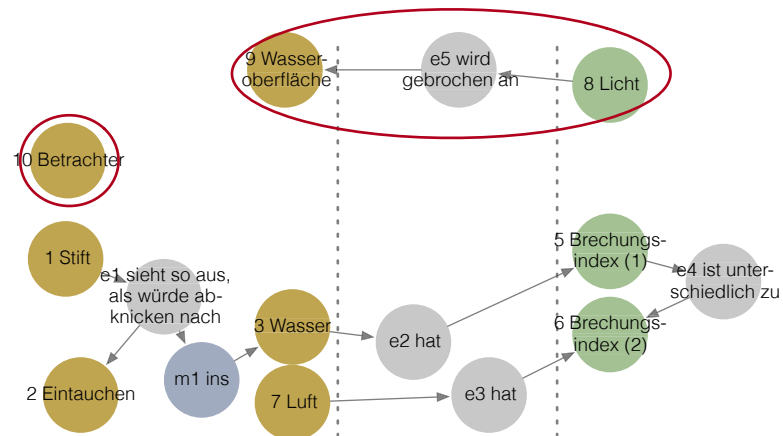


Concept Map zur Erklärung eo4-A (bereinigt)

eo4-C

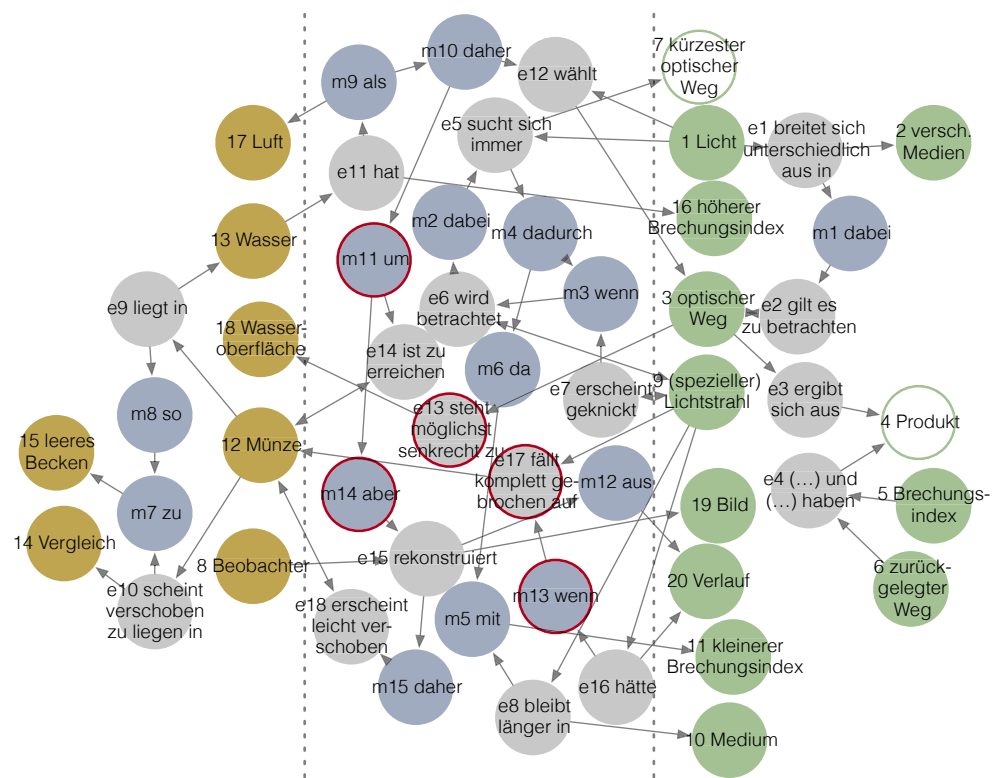


Concept Map zur Erklärung eo4-C

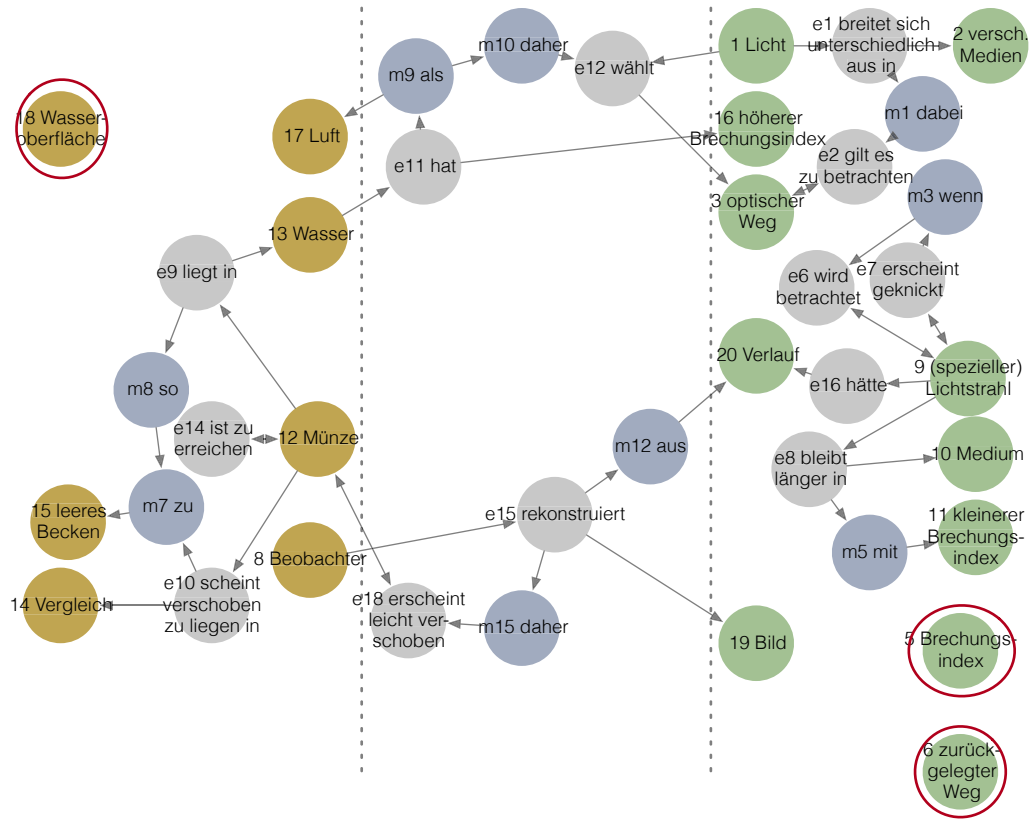


Concept Map zur Erklärung eo4-C (bereinigt)

foi-B

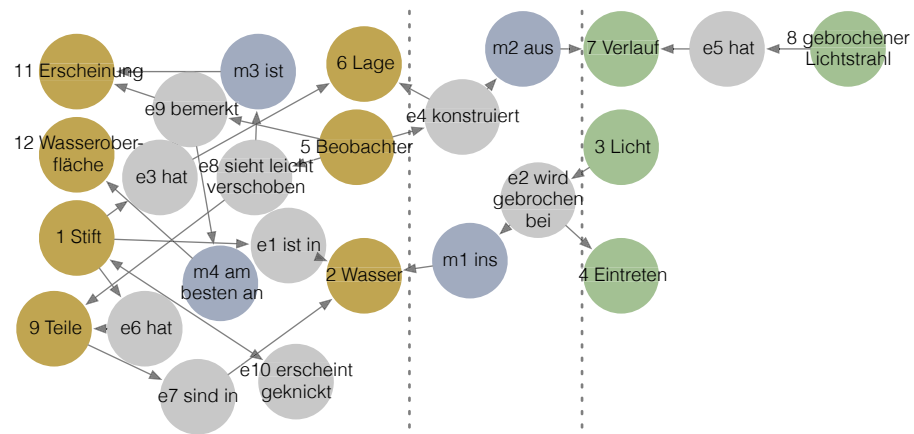


Concept Map zur Erklärung foI-B



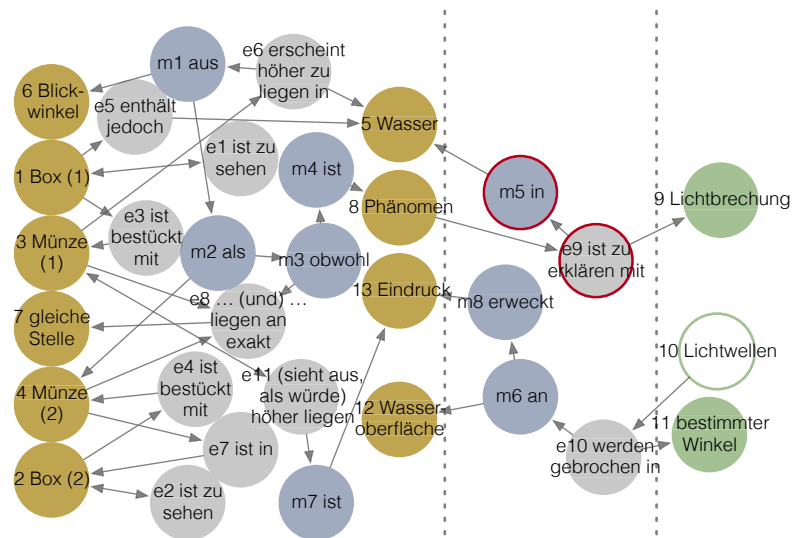
Concept Map zur Erklärung for-B (bereinigt)

foi-C

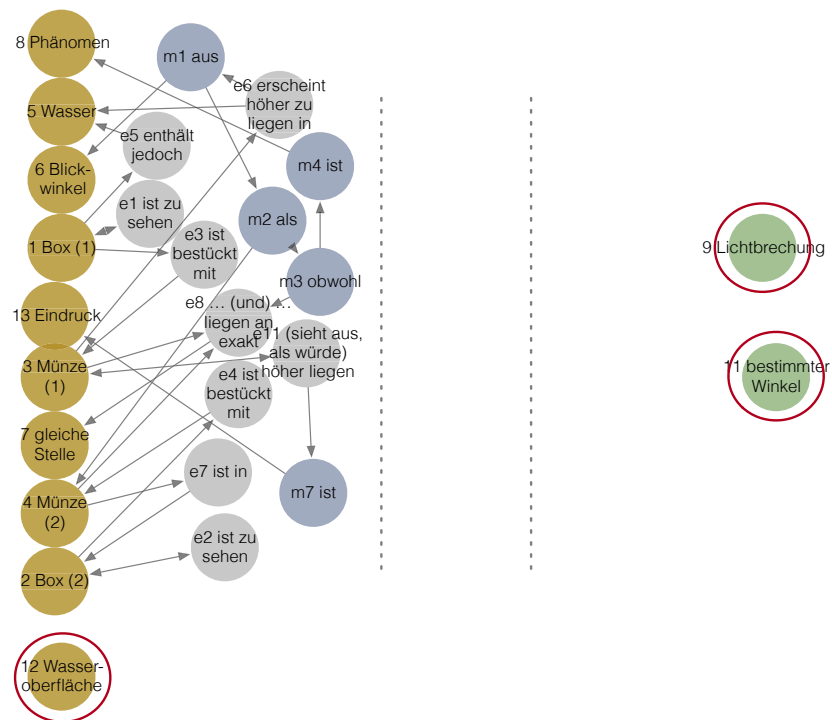


Concept Map zur Erklärung for-C

fo2-B

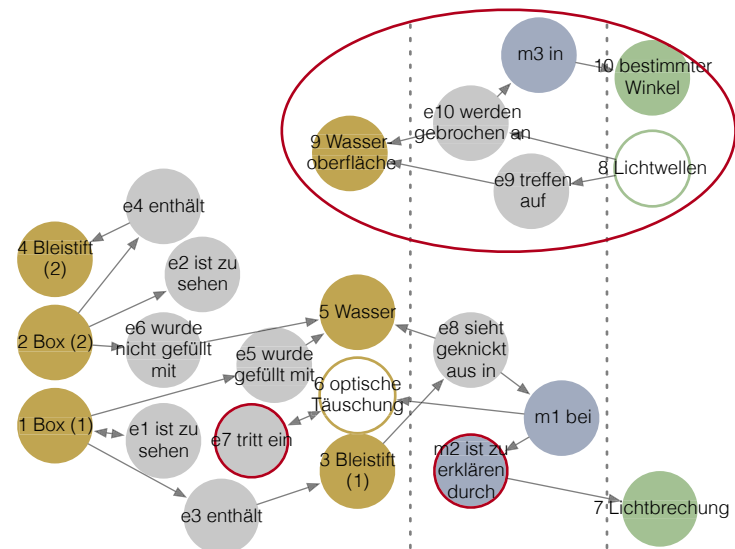


Concept Map zur Erklärung fo2-B

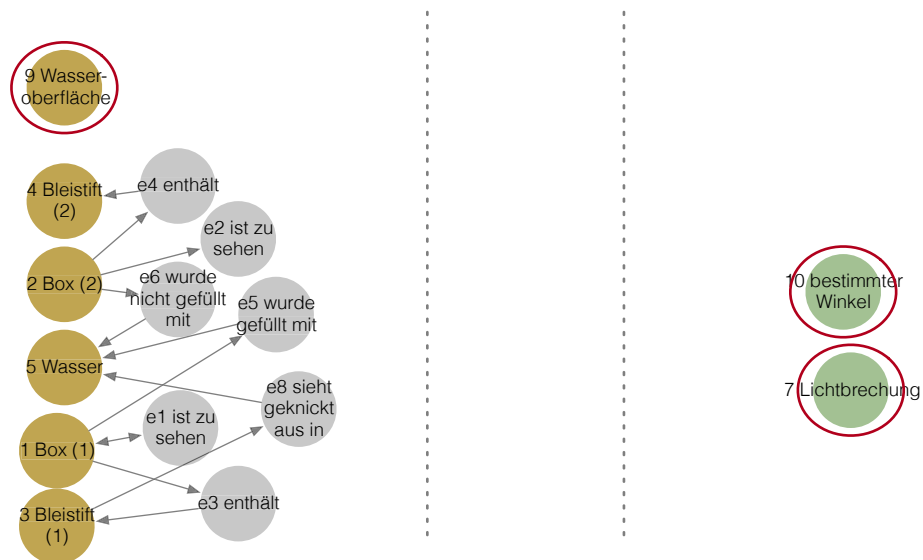


Concept Map zur Erklärung fo2-B (bereinigt)

fo2-C

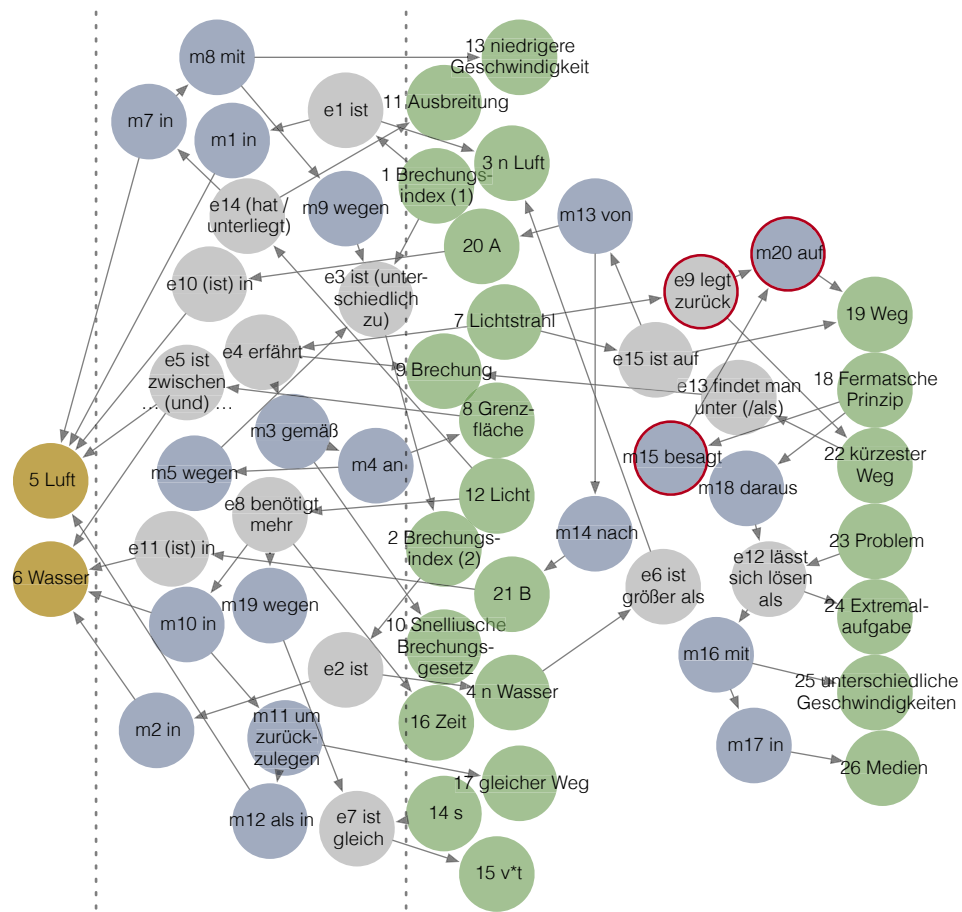


Concept Map zur Erklärung fo2-c



Concept Map zur Erklärung fo2-C (bereinigt)

gor-A

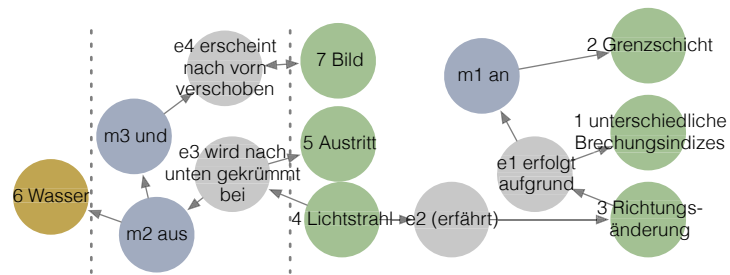


Concept Map zur Erklärung gor-A



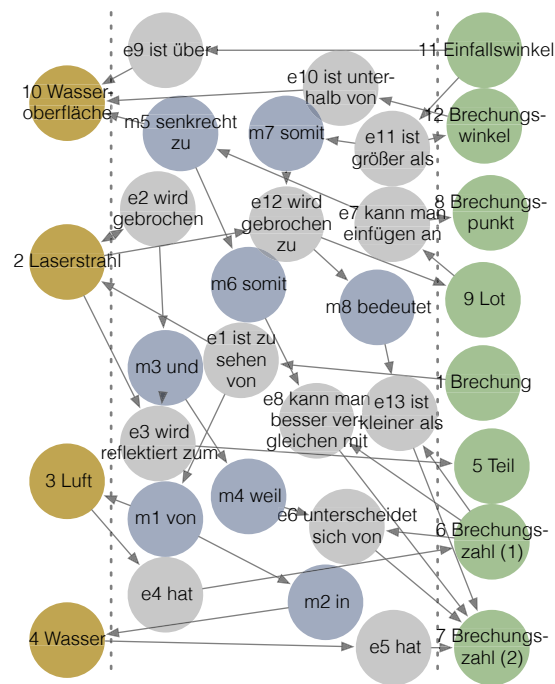
Concept Map zur Erklärung gor-A (bereinigt)

gor-B



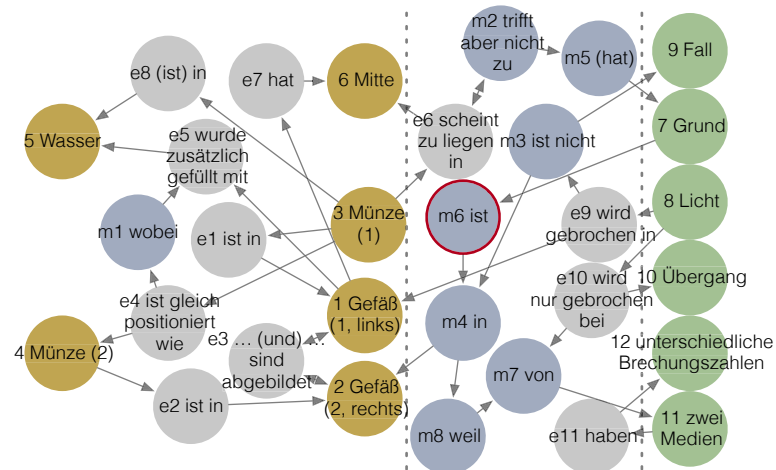
Concept Map zur Erklärung gor-B

go2-A

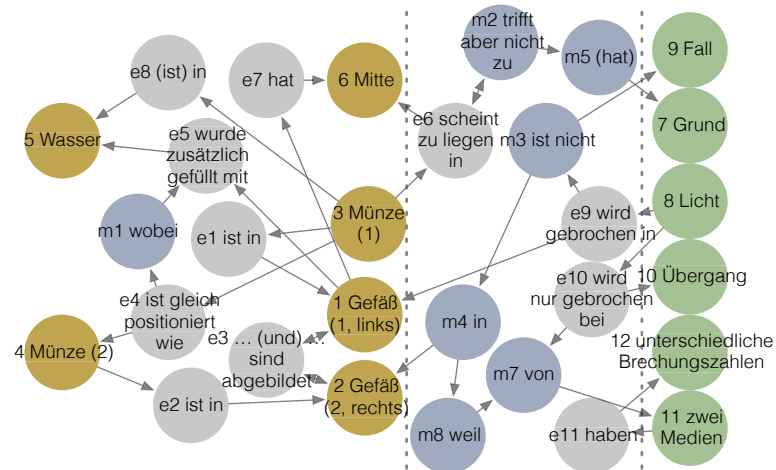


Concept Map zur Erklärung go2-A

go2-B

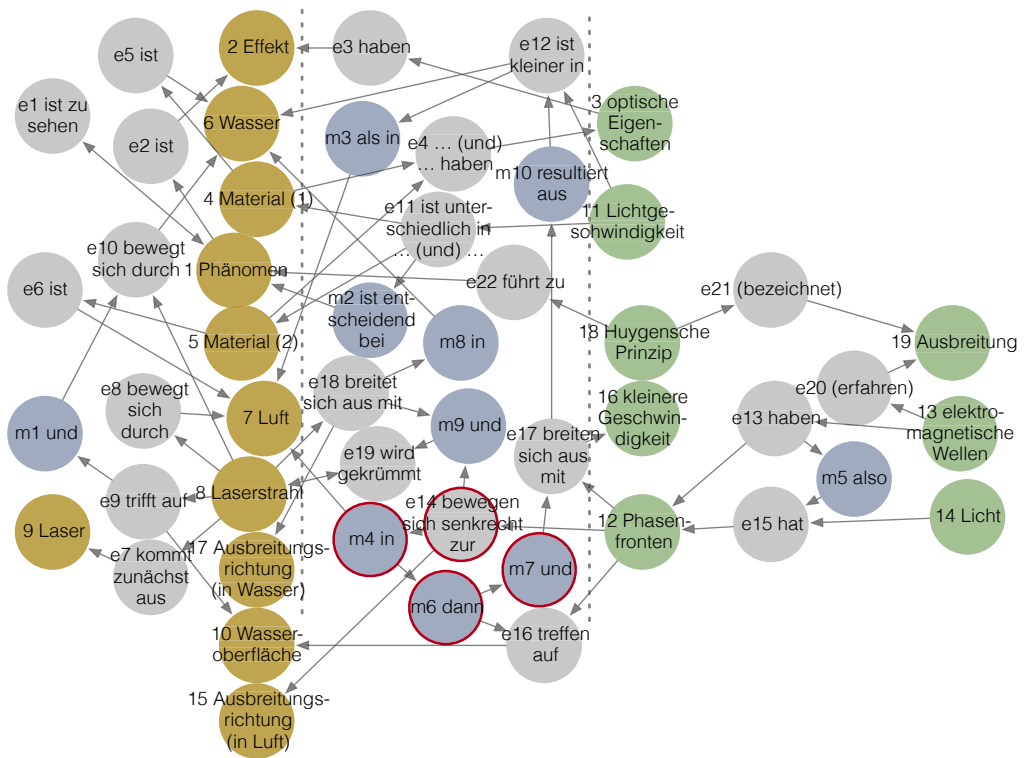


Concept Map zur Erklärung go2-B



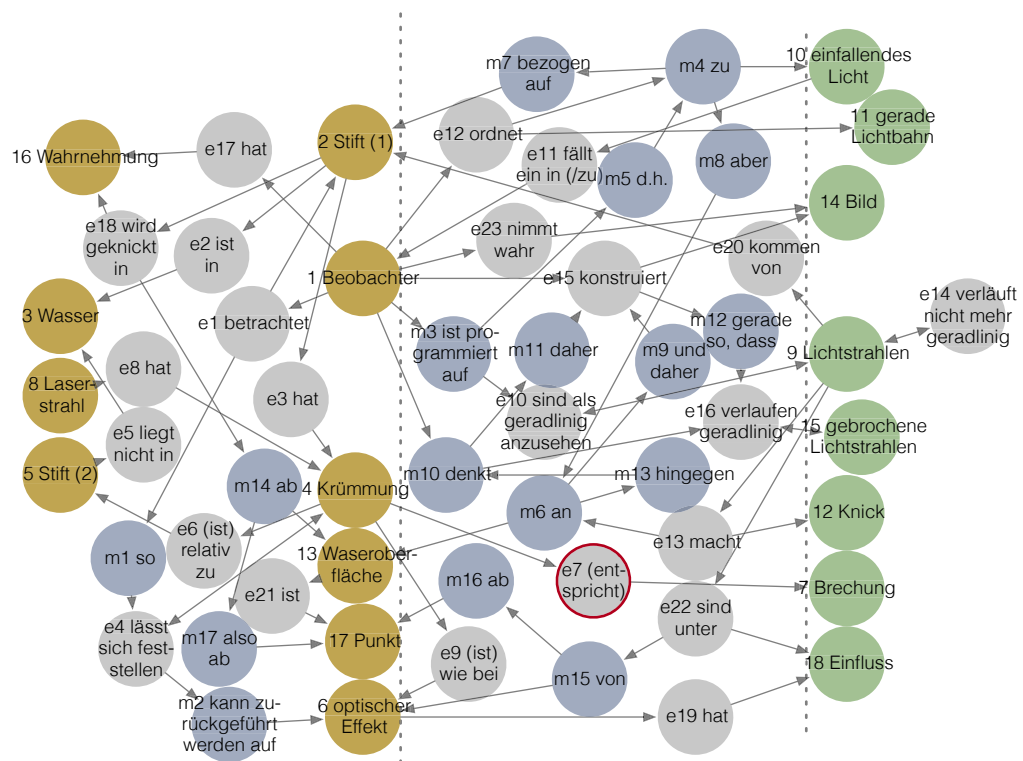
Concept Map zur Erklärung go2-B (bereinigt)

hor-A

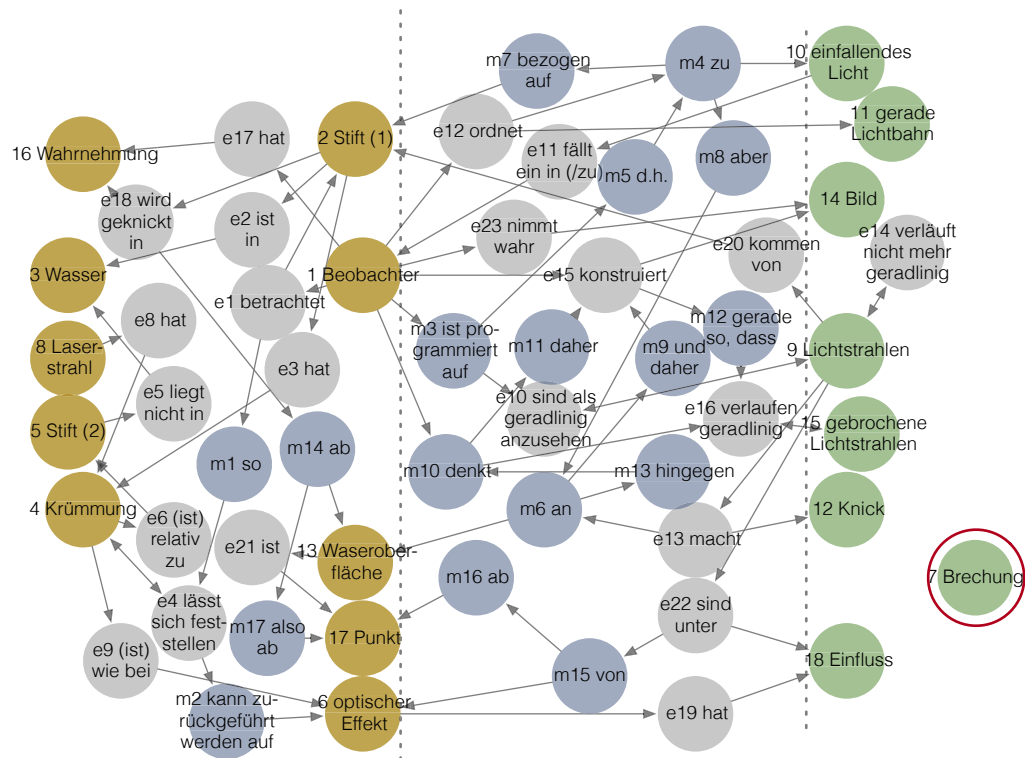


Concept Map zur Erklärung hor-A

hoI-C

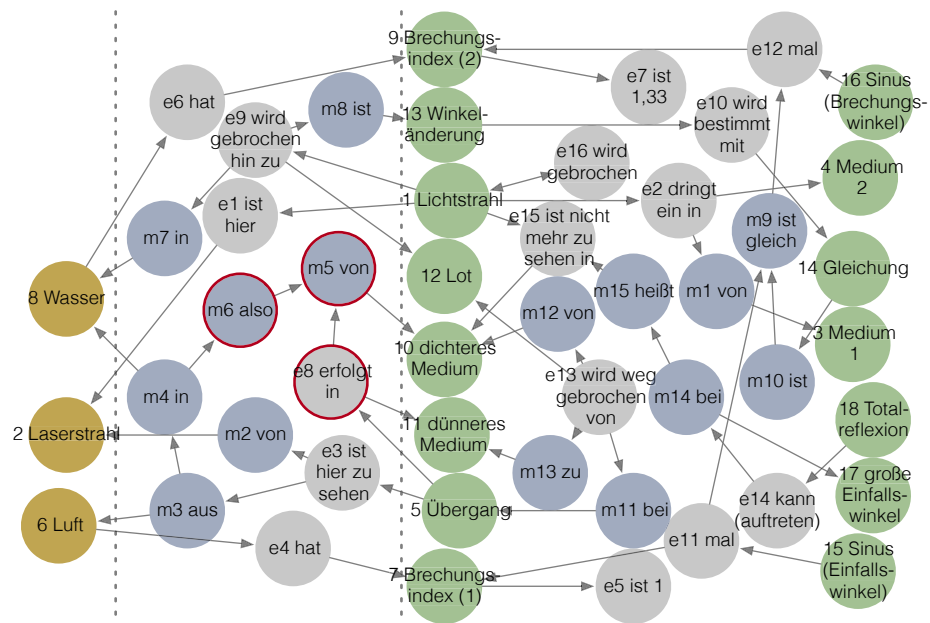


Concept Map zur Erklärung hoI-C



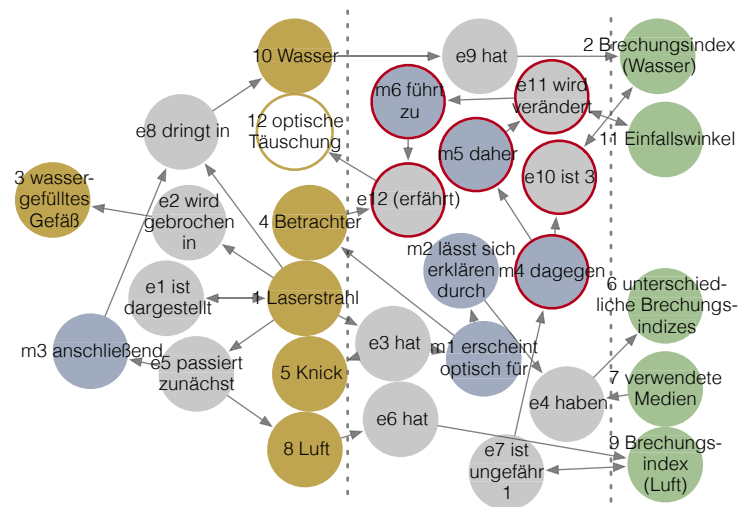
Concept Map zur Erklärung ho1-C (bereinigt)

ho2-A

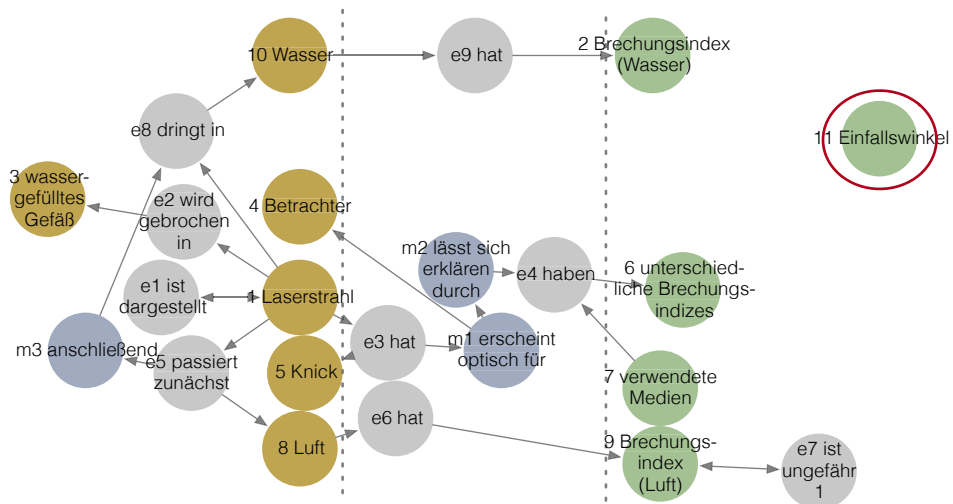


Concept Map zur Erklärung ho2-A

ho3-A

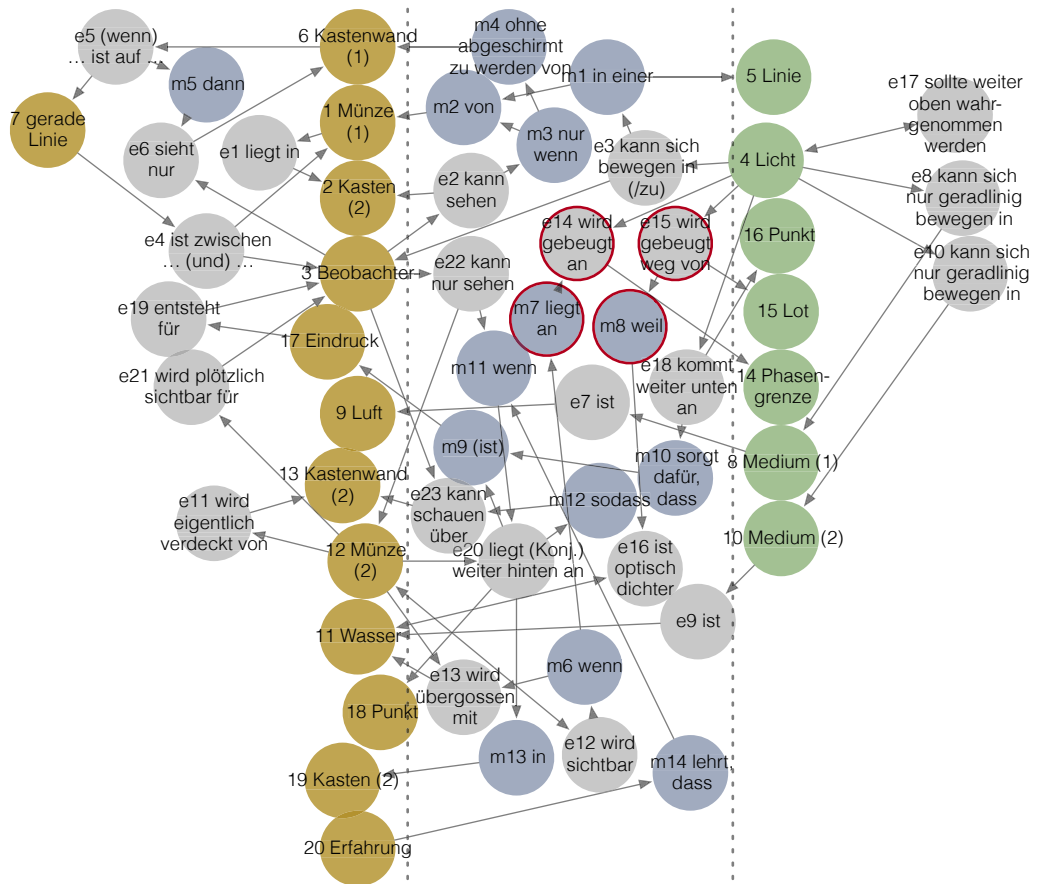


Concept Map zur Erklärung ho3-A

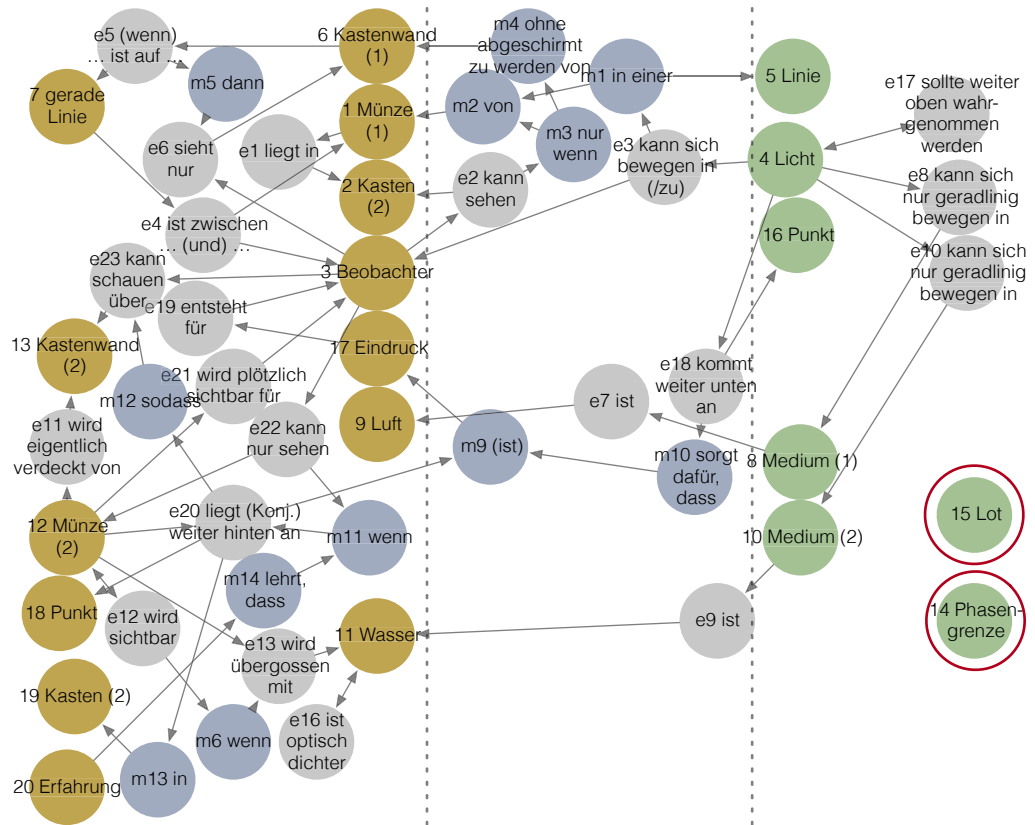


Concept Map zur Erklärung ho3-A (bereinigt)

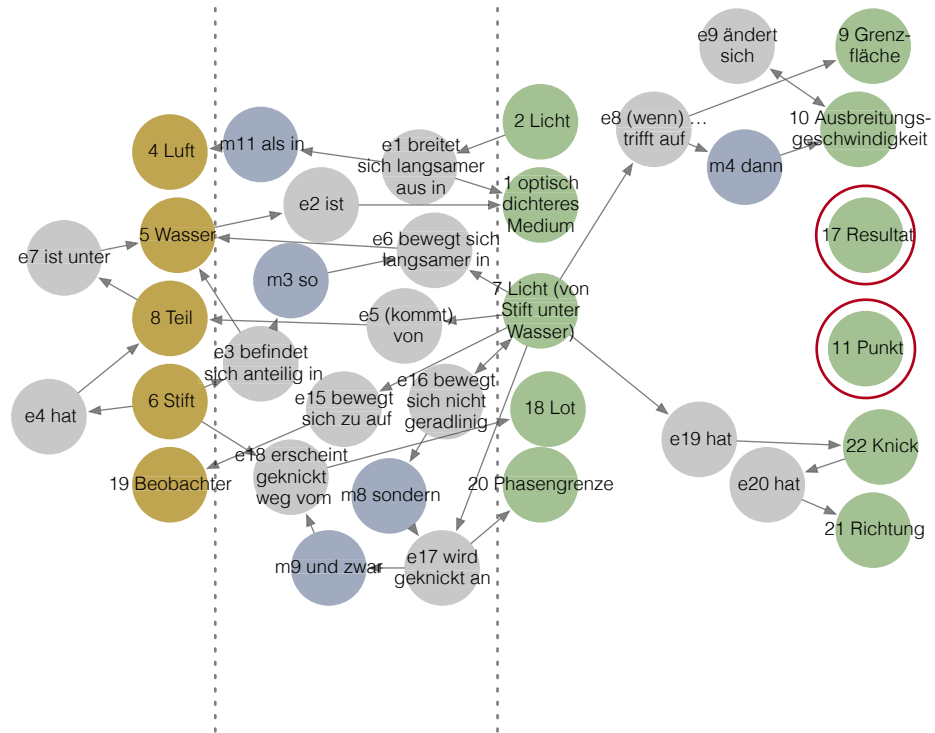
joir-B



Concept Map zur Erklärung joir-B

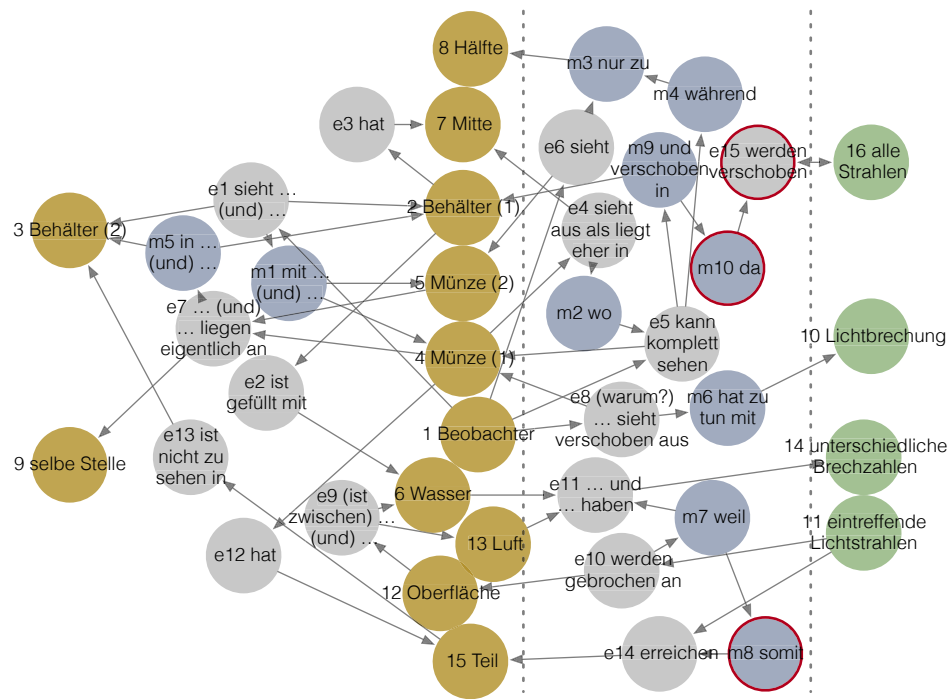


Concept Map zur Erklärung jor-B (bereinigt)

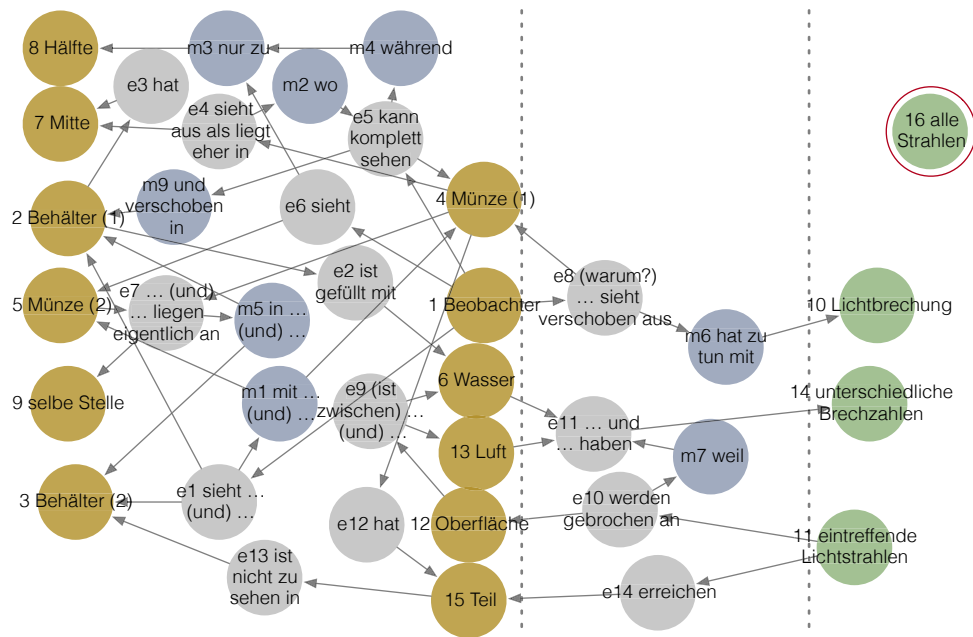


Concept Map zur Erklärung jor-C (bereinigt)

j02-B

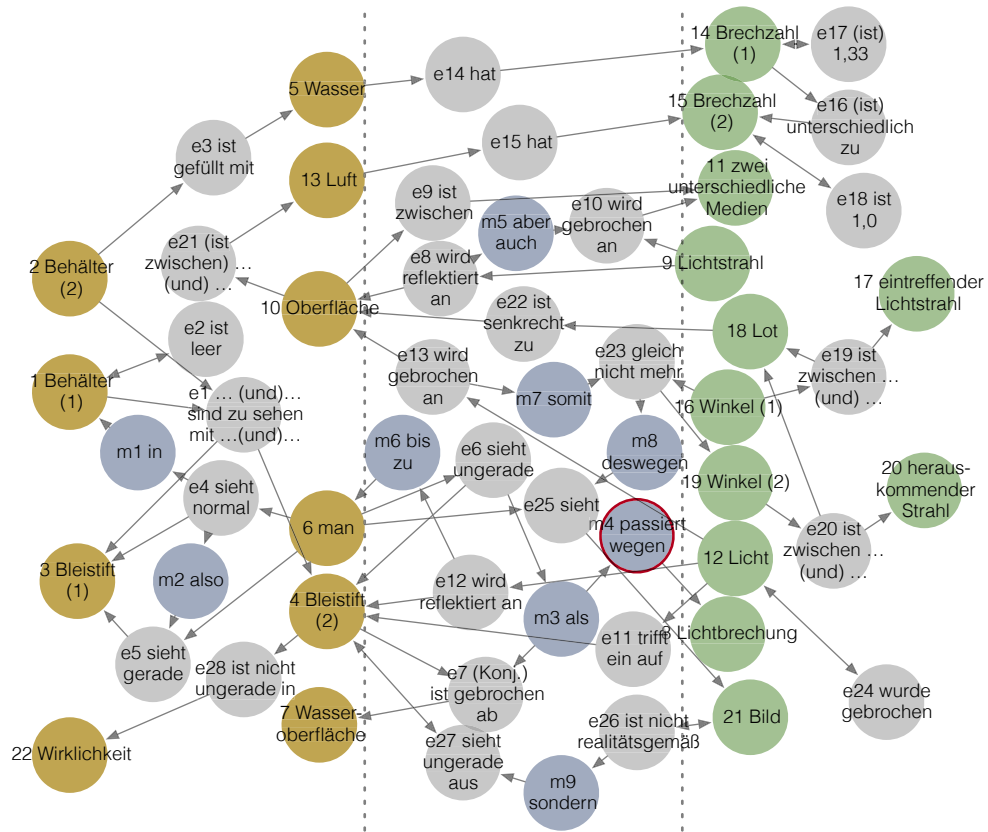


Concept Map zur Erklärung j02-B

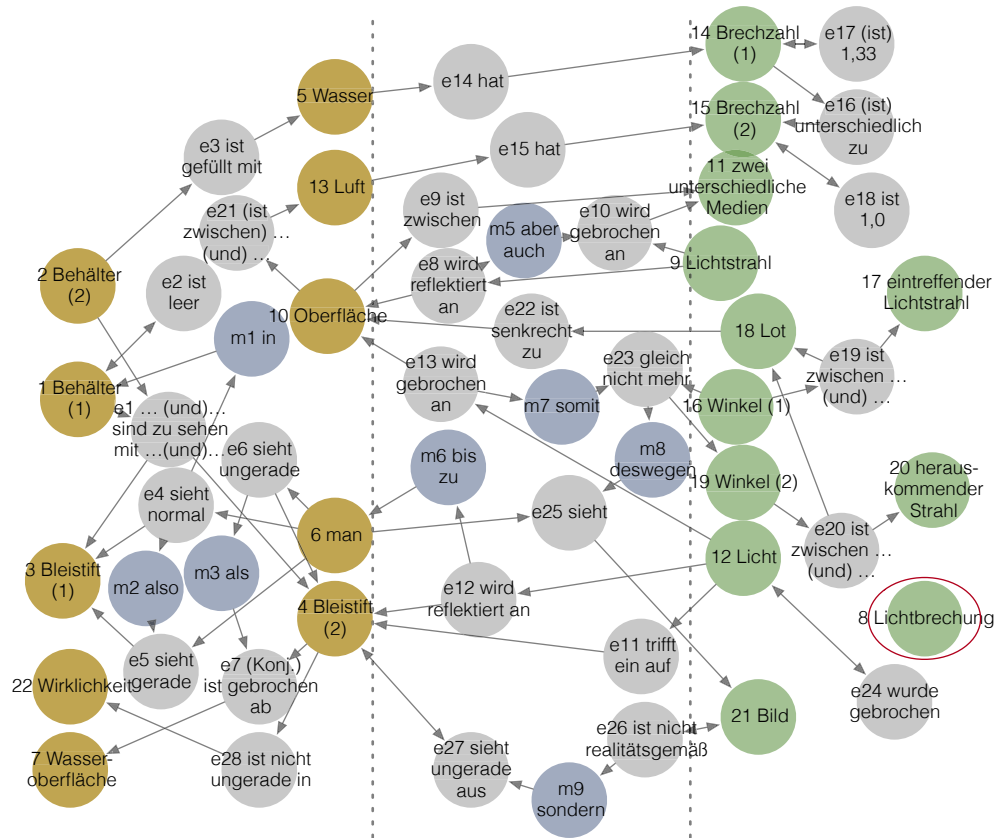


Concept Map zur Erklärung jo2-B (bereinigt)

j02-C

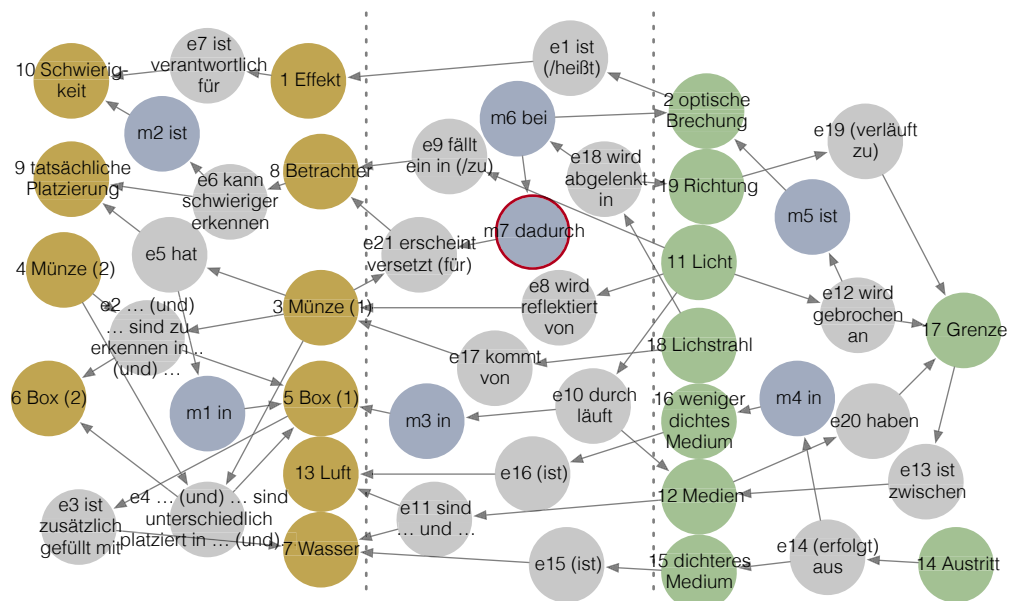


Concept Map zur Erklärung j02-C

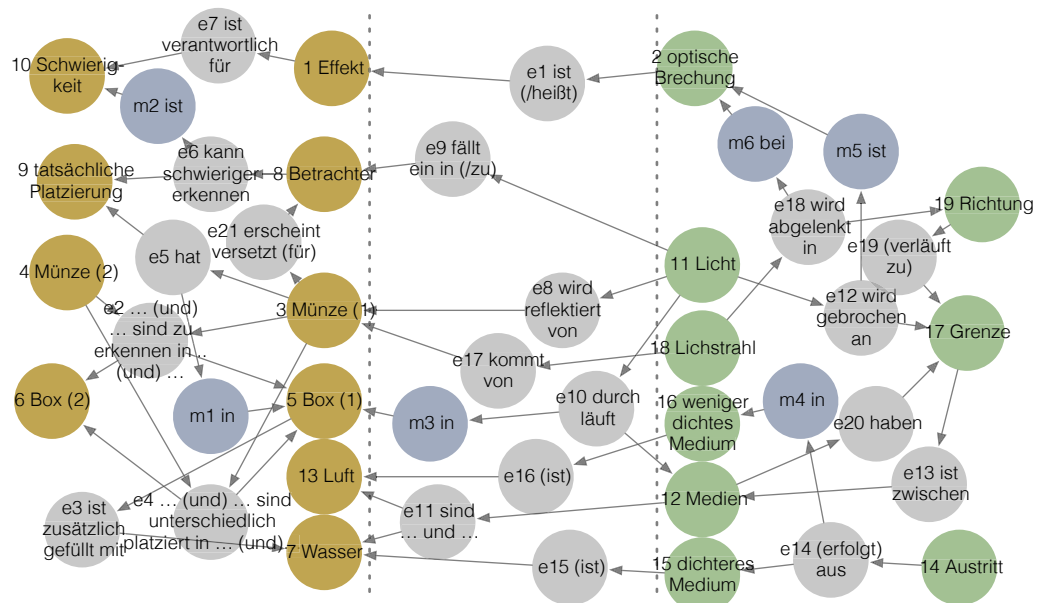


Concept Map zur Erklärung joi-2 (bereinigt)

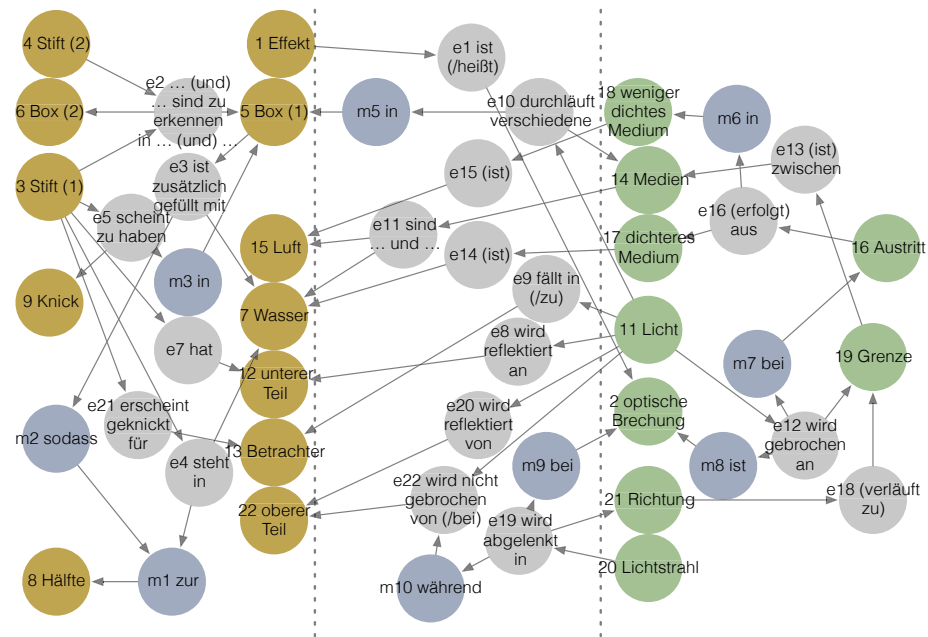
jo4-B



Concept Map zur Erklärung jo4-B

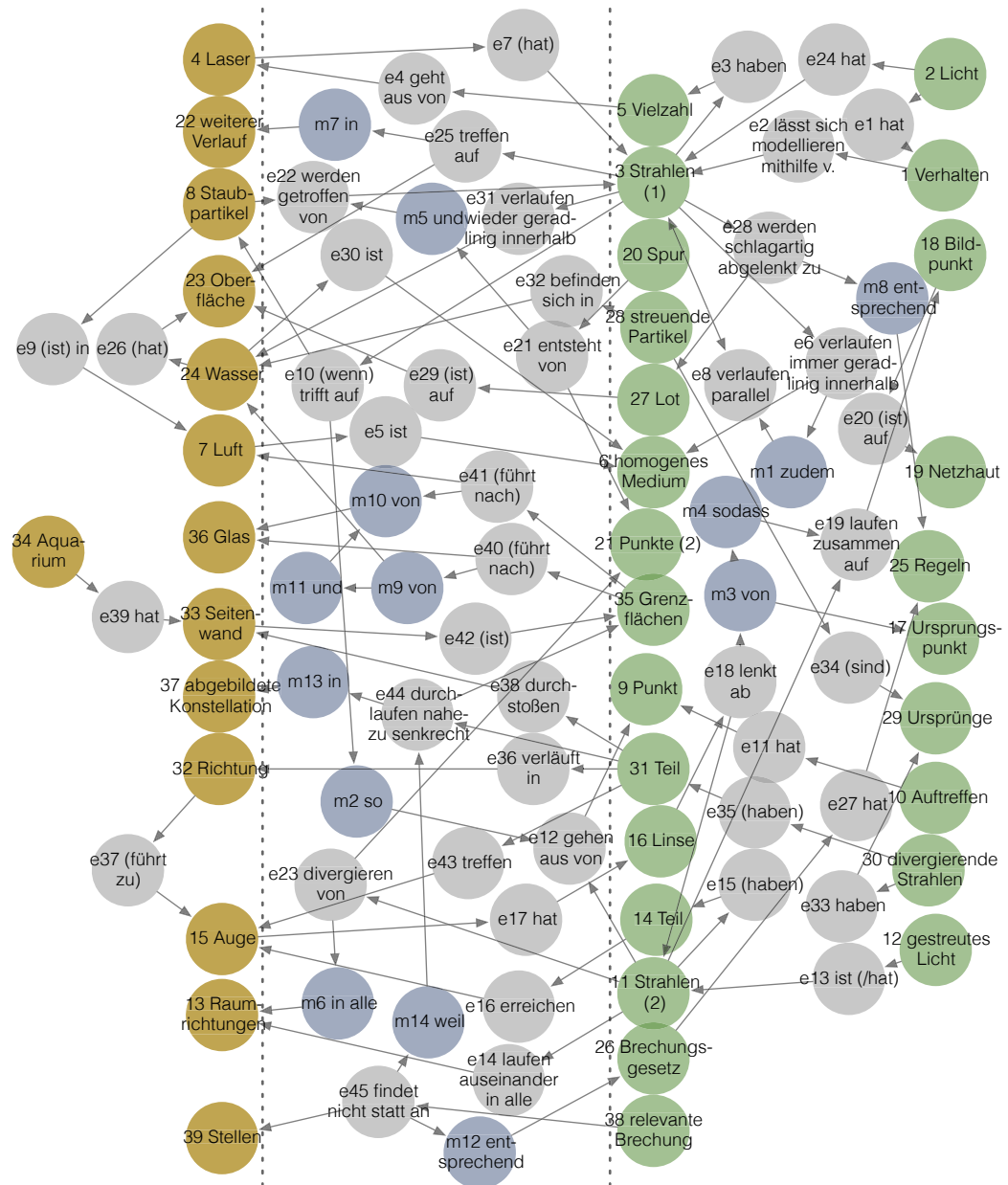


Concept Map zur Erklärung jo4-B (bereinigt)



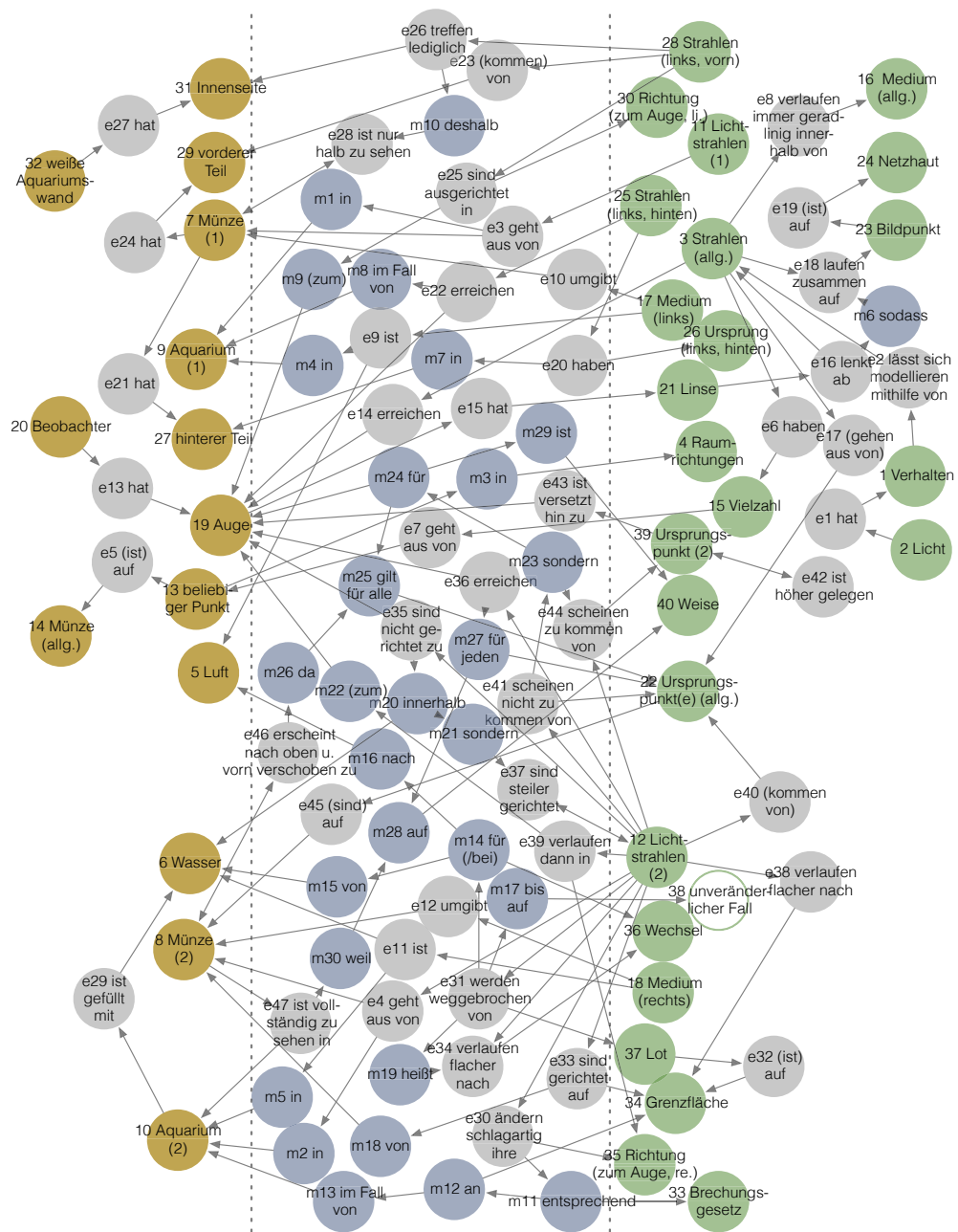
Concept Map zur Erklärung jo4-C (bereinigt)

xoi-A



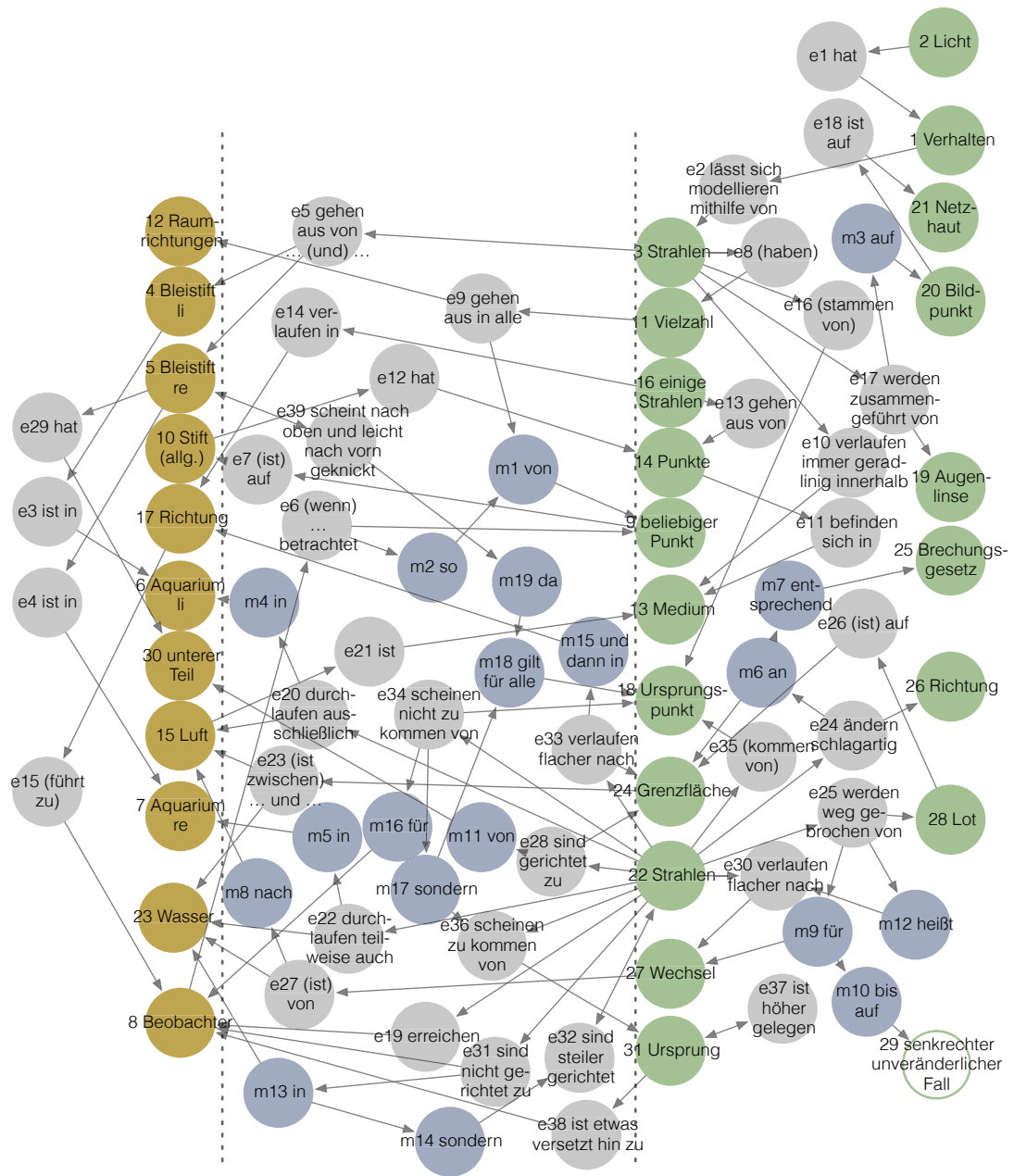
Concept Map zur Erklärung xoi-A

xoi-B



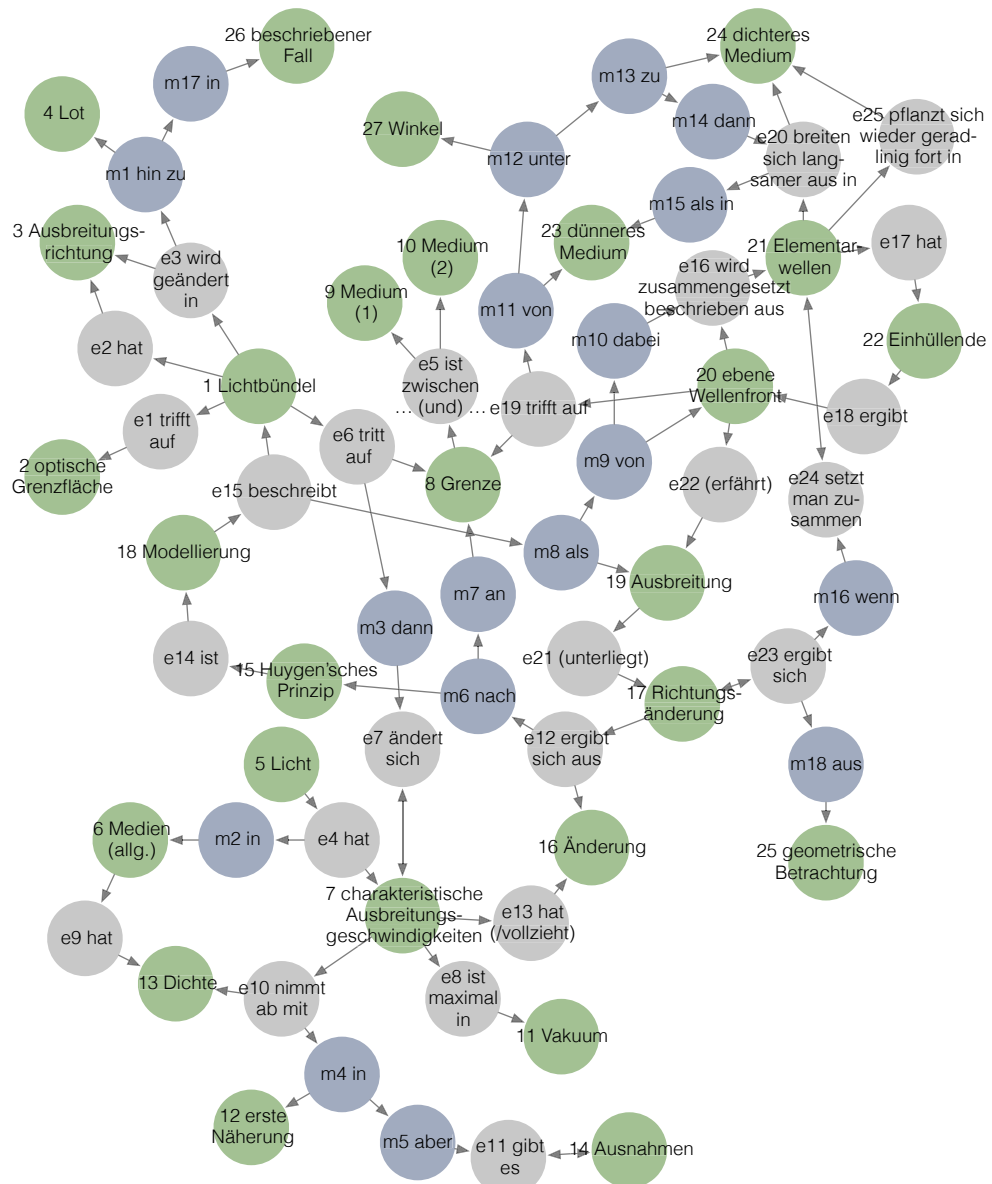
Concept Map zur Erklärung xoi-B

xoi-C



Concept Map zur Erklärung xoi-C

x02-A



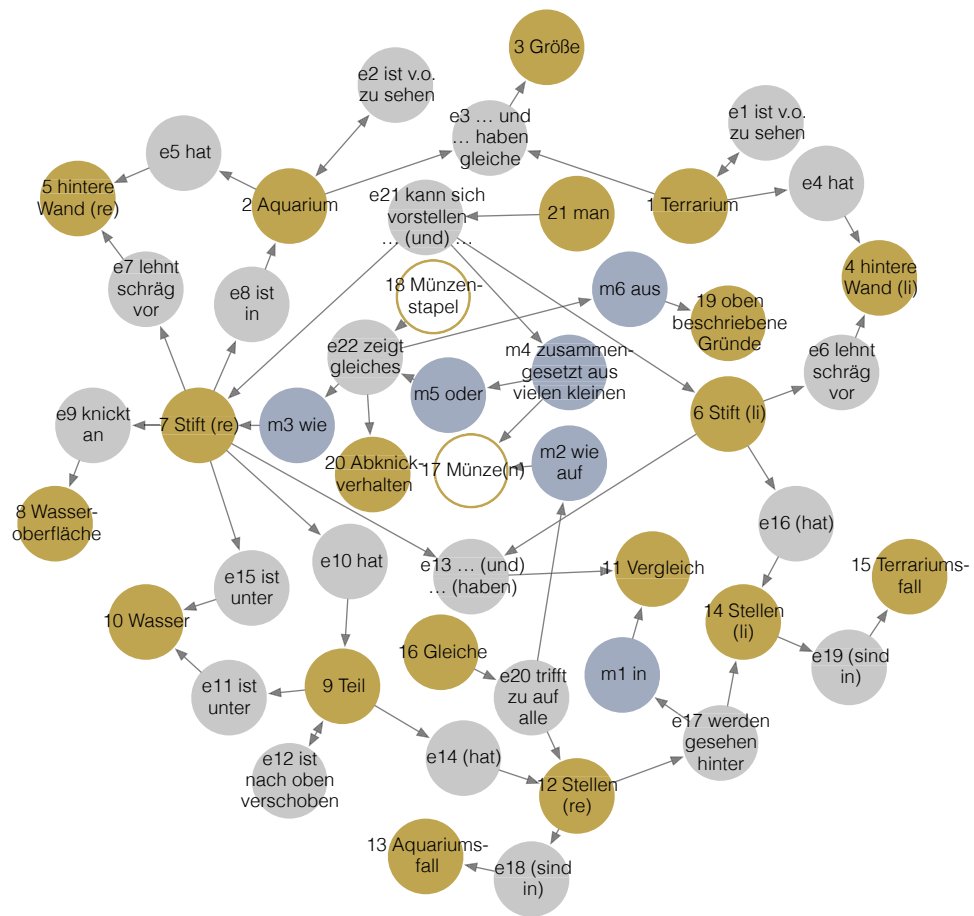
Concept Map zur Erklärung x02-A

xO2-C

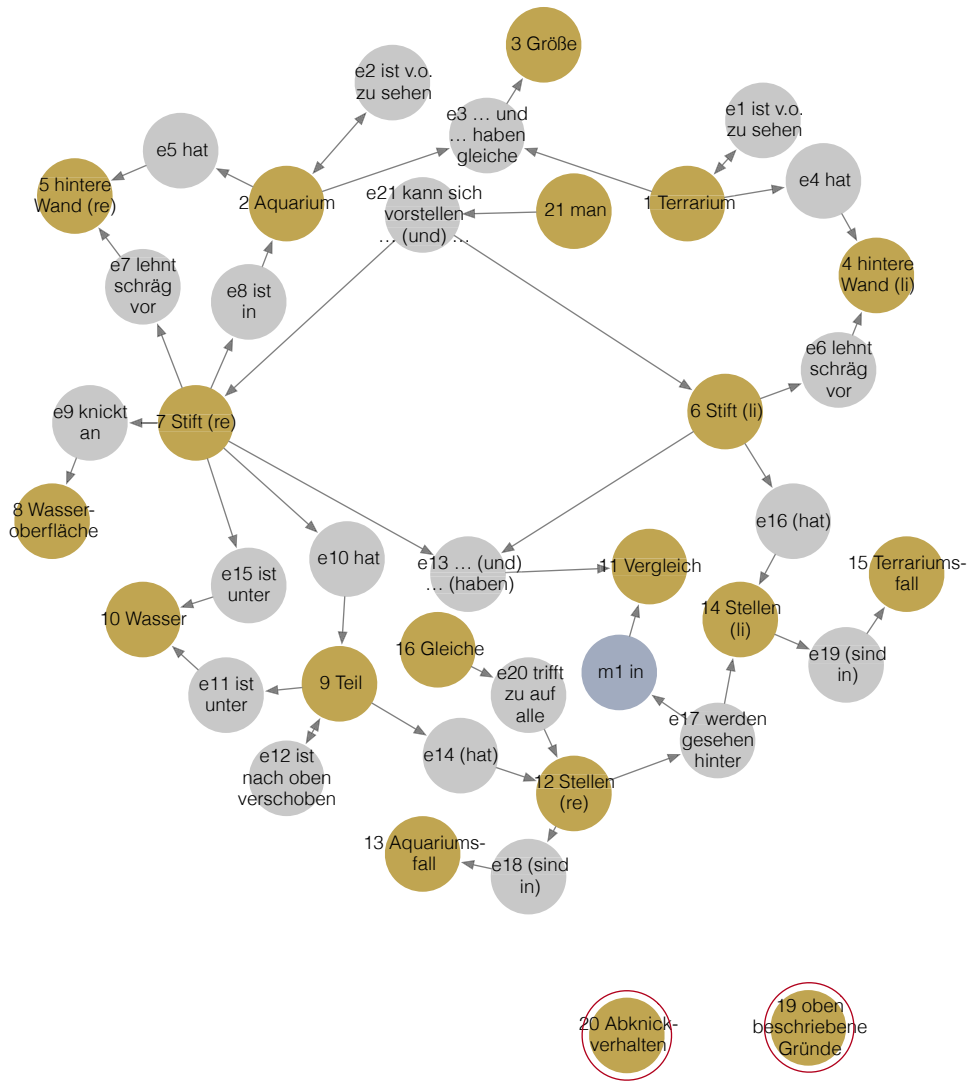


Concept Map zur Erklärung x02-C

x03-C



Concept Map zur Erklärung x03-C



Concept Map zur Erklärung NO_3^- -C (bereinigt)

H ARBEITSAUFTRAG ZUR HAUPTSTUDIE

UNTERSUCHUNG VON ERKLÄRUNGEN OPTISCHER PHÄNOMENE

Steffen Wagner, AG Didaktik der Physik,
HU Berlin, 4.7.-7.7. 2016

Angaben:

Probandennr.: j04
Studiengang: _____
Fachsemester: _____
Optik-Vorlesung
gehört?: ja nein

Arbeitsauftrag:

Auf Ihrem Arbeitsplatz finden Sie Fotos von zwei optischen Phänomenen. Erklären Sie die dargestellten Phänomene einzeln und unabhängig voneinander jeweils kurz schriftlich auf dem bereit stehenden Computer. Stellen Sie sich vor, Sie sollen eine Erklärung für ein Lehrbuch zur Optik oder für einen Kommilitonen erstellen.

Für jede der beiden Erklärung ist ein Textfenster geöffnet. Benutzen Sie gegebenenfalls auch das bereitliegende Papier, um eine Skizze für ihre Erklärungen zu erstellen, sofern Sie diese benötigen.

Sie können bei Bedarf die Phänomene auch an den Versuchstischen beobachten.

Benachrichtigen Sie bitte den Leiter der Studie, wenn Sie beide Erklärungen erstellt haben.

Vielen Dank,
Steffen Wagner.

Abbildung H.1: Arbeitsauftrag der Hauptstudie

LITERATUR

- Adobe Illustrator. Adobe Systems Incorporated.
- Adúriz-Bravo, A. (2013). A Semantic View of Scientific Models for Science Education. *Science & Education*, 22(7), 1593–1611.
- Ahlberg, M. (2004). Varieties of Concept Mapping. In *Concept Maps: Theory, Methodology, Technology. Proceedings of the First International Conference on Concept Mapping*. CMC (S. 14–17).
- Airey, J. & Linder, C. (2009). A Disciplinary Discourse Perspective on University Science Learning: Achieving Fluency in a Critical Constellation of Modes. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(1), 27–49.
- Anderson, J. R. (2013). *Kognitive Psychologie*. Lehrbuch. Berlin: Springer VS.
- Andersson, B. & Kärrqvist, C. (1983). How Swedish Pupils, Aged 12-15 Years, Understand Light and Its Properties. *European Journal of Science Education*, 5(4), 387–402.
- Apple Numbers (Version 3.6.2). Apple Inc.
- Ausubel, D. P. (2000). *The Acquisition and Retention of Knowledge: A Cognitive View*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Bader, F. (Hrsg.). (2001). *Dorn / Bader Physik Sek 1*. Hannover: Schroedel.
- Bailer-Jones, D. M. (2003). Models, Theories and Phenomena. *Proceedings of Logic Methodology and Philosophy of Science*.
- Baucum, J. (2017). Hurricane Irma Track: Which Forecasting Model Is Most Accurate? Zugriff 10. September 2017 unter <https://www.usatoday.com/story/news/nation-now/2017/09/07/hurricane-irma-track-which-forecasting-model-most-accurate/644748001/>
- Bayer, R., Bredthauer, W., Bruns, K. G., Klar, G., Lichtfeld, M., Schmidt, M. & Wessels, P. (2011). *Impulse Physik*. Stuttgart: Klett.
- Bleichroth, W. (1991). Elementarisierung, das Kernstück der Unterrichtsvorbereitung. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 2(6), 4–11.
- Blum, J., Gundlach, B., Güttler, C. & Sierks, H. (2017). Rätselhafte Kometenentstehung. *Physik Journal*, 16(6).
- Boczianowski, F. (2011). *Eine empirische Untersuchung zu Vektoren im Physikunterricht der Mittelstufe*. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos-Verlag.
- Bohr, N. (1981). The Trilogy: On The Constitutions of Atoms and Molecules. In *Niels Bohr Collected Works* (Bd. 2, S. 159–233). Elsevier.
- Bortz, J. & Döring, N. (2002). *Forschungsmethoden und Evaluation*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Boulter, C. J. & Gilbert, J. K. (1996). Typologies of Models for Explaining Science Content. Annual Meeting of National Association for Research in Science Teaching. St. Louis, Missouri.

- Boumans, M. J. (1999). Built-In Justifications. In M. S. Morgan & M. Morrison (Hrsg.), *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Sciences* (S. 66–96). Ideas in context. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Boysen, G. (Hrsg.). (1992). *Optik, Mechanik, Wärmelehre*. Berlin: Cornelsen, Teilband 1. Physik für Gymnasien.
- Bruner, J. S. (1966). *Toward a Theory of Instruction*. Cambridge, Massachusetts: Belknap Press of Harvard University.
- Carley, K. & Palmquist, M. (1992). Extracting, Representing, and Analyzing Mental Models. *Social Forces*, 70(3), 601.
- Cartwright, N. (1983). *How the Laws of Physics Lie*. Oxford: Oxford University Press.
- Chalmers, A. F. (2007). *Wege der Wissenschaft: Einführung in die Wissenschaftstheorie*. Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Cheng, M.-F. & Brown, D. E. (2015). The Role of Scientific Modeling Criteria in Advancing Students' Explanatory Ideas of Magnetism. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(8), 1053–1081.
- Chi, M. T. (1978). Knowledge Structures and Memory Development. *Children's thinking: What develops*, 1, 75–96.
- Chi, M. T., Feltovich, P. J. & Glaser, R. (1981). Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices. *Cognitive Science*, 5(2), 121–152.
- Chinn, C. A. & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically Authentic Inquiry in Schools: A Theoretical Framework for Evaluating Inquiry Tasks. *Science Education*, 86(2), 175–218.
- Chittleborough, G. & Treagust, D. F. (2007). The Modelling Ability of Non-Major Chemistry Students and Their Understanding of the Sub-Microscopic Level. *Chemistry Education Research and Practice*, 8(3), 274–292.
- Cieplik, D. (Hrsg.). (2006). *Erlebnis Physik*. Braunschweig: Schroedel.
- Coll, R. K. & Treagust, D. F. (2003). Investigation of Secondary School, Undergraduate, and Graduate Learners' Mental Models of Ionic Bonding. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(5), 464–486.
- Dagher, Z. & Cossman, G. (1992). Verbal Explanations given by Science Teachers: Their Nature and Implications. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(4), 361–374.
- Davies, M. (2011). Concept Mapping, Mind Mapping and Argument Mapping: What Are the Differences and Do They Matter? *Higher Education*, 62(3), 279–301.
- Demtröder, W. (2009). *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Demtröder, W. (2013). *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*. Experimentalphysik. Berlin: Springer Spektrum.
- DiSessa, A. A. (1988). Knowledge in Pieces. In G. Forman & P. B. Pufall (Hrsg.), *Constructivism in the Computer Age* (S. 49–70). New Jersey: Lawrence Erlbaum Publishers.
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Dürscheid, C. & Businger, M. (2012). *Syntax: Grundlagen und Theorien*. UTB. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.

- Eckert, M. (2013). Die Geburt der modernen Atomtheorie: Hundert Jahre Bohrsches Atommodell. *Physik in unserer Zeit*, 44(4), 168–173.
- Eppler, M. J. (2006). A Comparison between Concept Maps, Mind Maps, Conceptual Diagrams, and Visual Metaphors as Complementary Tools for Knowledge Construction and Sharing. *Information Visualization*, 5(3), 202–210.
- Erb, R. (1992). Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip. *Physik in der Schule*, 30(9), 291–295.
- Erduran, S. & Duschl, R. A. (2004). Interdisciplinary Characterizations of Models and the Nature of Chemical Knowledge in the Classroom. *Studies in Science Education*, 40(1), 105–138.
- Field, A. P., Miles, J. & Field, Z. (2012). *Discovering Statistics Using R*. London: Sage.
- Fischler, H. & Peuckert, J. (2000). Concept Mapping in Forschungszusammenhängen. In H. Fischler & J. Peuckert (Hrsg.), *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie* (Bd. 1). Studien zum Physiklernen. Berlin: Logos.
- Fredlund, T., Linder, C., Airey, J. & Linder, A. (2014). Unpacking Physics Representations: Towards an Appreciation of Disciplinary Affordance. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 10(2).
- Frege, G. (1892). Über Sinn und Bedeutung. *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*, 100, 25–50.
- Frigg, R. (2006). Scientific Representation and the Semantic View of Theories. *Theoria. Revista de Teoría, Historia y Fundamentos de la Ciencia*, 21(1), 49–65.
- Frigg, R. & Hartmann, S. (2017). *Models in Science*. In E. N. Zalta (Hrsg.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Galili, I. & Hazan, A. (2000). Learners' Knowledge in Optics: Interpretation, Structure and Analysis. *International Journal of Science Education*, 22(1), 57–88.
- Gephi (Version 0.9.1). Gephi contributors.
- Giancoli, D. C. (2010). *Physik*. München: Pearson Studium.
- Giere, R. N. (1988). *Explaining Science: A Cognitive Approach*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Giere, R. N. (1991). *Understanding Scientific Reasoning* (3.). Fort Worth, TX: Holt, Rinehart and Winston.
- Gilbert, J. K. (2004). Models and Modelling: Routes to More Authentic Science Education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115–130.
- Gilbert, J. K. (2005). Visualization: A Metacognitive Skill in Science and Science Education. In J. K. Gilbert (Hrsg.), *Visualization in Science Education* (S. 9–27). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Gilbert, J. K., Boulter, C. & Rutherford, M. (1998). Models in Explanations, Part 1: Horses for Courses? *International Journal of Science Education*, 20(1), 83–97.
- Gilbert, J. K. & Watts, D. M. (1983). Concepts, Misconceptions and Alternative Conceptions: Changing Perspectives in Science Education. *Studies in Science Education*, 10(1), 61–98.
- Gläser, J. & Laudel, G. (2010). *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. Wiesbaden: VS Verlag.

- Graf, D. (2014). Concept Mapping als Diagnosewerkzeug. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Scherker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 325–337). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Grebe-Ellis, J. (2006). Von der Optik im Tastraum zu einer Optik des Sehens. In J. Grebe-Ellis & F. Theilmann (Hrsg.), *open eyes: Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik* (S. 235–245). Berlin: Logos Verlag.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E. & Smith, C. L. (1991). Understanding Models and Their Use in Science: Conceptions of Middle and High School Students and Experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 799–822.
- Grusche, S. & Wagner, S. (2016). Two Different Looks at Kepler's Refraction Experiment. *Physics Education*, 51(6).
- Gurlitt, J. (2012). Concept Maps. In N. M. Seel (Hrsg.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (S. 730–732). Boston: Springer US.
- Harrison, A. G. & Treagust, D. F. (1993). Teaching with Analogies: A Case Study in Grade-10 Optics. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(10), 1291–1307.
- Harrison, A. G. & Treagust, D. F. (2000). A Typology of School Science Models. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011–1026.
- Härtig, H. (2010). *Sachstrukturen von Physikschulbüchern als Grundlage zur Bestimmung der Inhaltsvalidität eines Tests*. Studien zum Physiklernen. Berlin: Logos-Verlag.
- Hecht, E. (2009). *Optik*. München: Oldenbourg.
- Hesse, M. B. (1966). *Models and Analogies in Science*. Notre Dame, Indiana: University of Notre Dame Press.
- Hoban, G. (2015). *Explaining as a Teaching Strategy*. In *Encyclopedia of Science Education*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Hoettecke, D. & Rieß, F. (2015). Naturwissenschaftliches Experimentieren im Lichte der jüngeren Wissenschaftsforschung - Auf der Suche nach einem authentischen Experimentbegriff der Fachdidaktik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 21(1), 127–139.
- Hüttebräuker, N. (2010). *Empirische Untersuchung zum Verständnis ikonischer Repräsentationen am Beispiel der optischen Brechung* (Masterarbeit, Ruhr-Universität, Bochum).
- Jackson, K. M. & Trochim, W. M. K. (2002). Concept Mapping as an Alternative Approach for the Analysis of Open-Ended Survey Responses. *Organizational Research Methods*, 5(4), 307–336.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*. Cognitive science series. Cambridge: Harvard University Press.
- Justi, R. & Gilbert, J. (2003). Models and Modelling in Chemical Education. In J. K. Gilbert, O. De Jong, R. Justi, D. F. Treagust & J. H. Van Driel (Hrsg.), *Chemical Education: Towards Research-Based Practice* (S. 47–68). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Kaewkhong, K., Mazzolini, A., Emarat, N. & Arayathanitkul, K. (2010). Thai High-School Students' Misconceptions about and Models of Light Refraction through Aplanar Surface. *Physics Education*, 45(1), 97.

- Kircher, E. (2015). Modellbegriff und Modellbildung in der Physikdidaktik. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik: Theorie und Praxis*. Springer Lehrbuch. Berlin: Springer Spektrum.
- KMK (Hrsg.). (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. München, Neuwied: Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, Wolters Kluwer.
- Knuuttila, T. (2005). *Models as Epistemic Artefacts: Toward a Non-Representationalist Account of Scientific Representation*. Helsinki: Department of Philosophy, Univ. of Helsinki.
- Knuuttila, T. (2011). Modelling and Representing: An Artefactual Approach to Model-Based Representation. *Studies in History and Philosophy of Science*, 42(2), 262–271.
- Kokkonen, T. & Mäntylä, T. (2017). Changes in University Students' Explanation Models of DC Circuits. *Research in Science Education*.
- Krell, M., Reinisch, B. & Krüger, D. (2015). Analyzing Students' Understanding of Models and Modeling Referring to the Disciplines Biology, Chemistry, and Physics. *Research in Science Education*, 45(3), 367–393.
- Krippendorff, K. (1980). *Content Analysis: An Introduction to Methodology*. Beverly Hills: Sage Publications, Inc.
- Landis, J. R. & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1).
- Larkin, J., McDermott, J., Simon, D. P. & Simon, H. A. (1980). Expert and Novice Performance in Solving Physics Problems. *Science*, 208(4450), 1335–1342.
- Lemke, J. L. (1983). Thematic Analysis: Systems, Structures, and Strategies. *Semiotic Inquiry*, 2(3), 159–187.
- Lemke, J. L. (1998). Teaching All the Languages of Science: Words, Symbols, Images, and Actions.
- Litfin, G. (2005). *Technische Optik in der Praxis*. New York: Springer-Verlag.
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse*. Weinheim, Basel: Beltz.
- Meschede, D., Gerthsen, C. & Vogel, H. (Hrsg.). (2015). *Gerthsen Physik*. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum.
- Metz, K. E. (1991). Development of Explanation: Incremental and Fundamental Change in Children's Physics Knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 785–797.
- Meyer, L. & Schmidt, G.-D. (Hrsg.). (2007). *Physik Lehrbuch für die Klassen 9/10 Berlin*. Berlin, Frankfurt a.M.: Duden Paetec Schulbuchverlag.
- Mikelskis-Seifert, S. (2010). Modelle – Schlüsselbegriff für Forschungs- und Lernprozesse in der Physik. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Mikelskis-Seifert, S. & Fischler, H. (2003). Die Bedeutung des Denkens in Modellen bei der Entwicklung von Teilchenvorstellungen – Empirische Untersuchung zur Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 9, 89–103.
- Morgan, M. S. & Morrison, M. (Hrsg.). (1999). *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Sciences*. New York: Cambridge University Press.
- Morrison, M. (1999). Models as Autonomous Agents. In M. S. Morgan & M. Morrison (Hrsg.), *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Sciences*. Ideas in context. New York: Cambridge University Press.

- Müller, M. (2017). *Grammatik der Natur. Von Wittgenstein Naturphänomene verstehen lernen*. Berlin: Logos-Verlag.
- Müller, M. & Schön, L.-H. (2009). „Eingebundene“ versus „abgelöste“ Perspektive - Vorschlag einer Begriffsklärung. In D. Höttecke (Hrsg.), *Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung in Schwäbisch Gmünd* (S. 217–219). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. 29; Jahrestagung 2008. Münster: Lit Verlag.
- Müller, R., Wodzinski, R. & Hopf, M. (Hrsg.). (2011). *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln: Aulis-Verlag.
- Mutschke, P. (2010). Zentralitäts- und Prestigemaße. In C. Stegbauer & R. Häußling (Hrsg.), *Handbuch Netzwerkforschung* (S. 365–378). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Nassar, A. B. (1994). Apparent Depth. *The Physics Teacher*, 32(9), 526–529.
- Nersessian, N. J. (2002). The Cognitive Basis of Model-Based Reasoning in Science. *The Cognitive Basis of Science*, 133–153.
- Nicolaou, C. & Constantinou, C. (2014). Assessment of the Modeling Competence: A Systematic Review and Synthesis of Empirical Research. *Educational Research Review*, 13, 52–73.
- Niedrig, H. (Hrsg.). (2004). *Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik*. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Nolting, W. (2013). *Elektrodynamik*. Grundkurs theoretische Physik. Berlin: Springer Spektrum.
- Novak, J. D. (1990). Concept Mapping: A Useful Tool for Science Education. *Journal of research in science teaching*, 27(10), 937–949.
- Novak, J. D. & Cañas, A. J. (2006). The Origins of the Concept Mapping Tool and the Continuing Evolution of the Tool. *Information Visualization*, 5(3), 175–184.
- Novak, J. D. & Cañas, A. J. (2008). *The Theory Underlying Concept Maps and How to Construct and Use Them*. Florida Institute for Human and Machine Cognition.
- Ogden, C. K. & Richards, I. A. (1989). *The Meaning of Meaning: A Study of the Influence of Language upon Thought and of the Science of Symbolism*. San Diego: Harcourt Brace Jovanovich.
- OmniGraffle (Version 7.0.2). Seattle: The Omni Group.
- OmniGraffle (Version 7.3.1). Seattle: The Omni Group.
- Passmore, C. (2015). *Models*. In R. Gunstone (Hrsg.), *Encyclopedia of Science Education* (S. 659–662). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Passmore, C., Gouvea, J. S. & Giere, R. (2014). Models in Science and in Learning Science: Focusing Scientific Practice on Sense-Making. In M. R. Matthews (Hrsg.), *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* (S. 1171–1202). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Peker, D. & Wallace, C. S. (2011). Characterizing High School Students' Written Explanations in Biology Laboratories. *Research in Science Education*, 41(2), 169–191.
- Pittner, K. (2016). *Einführung in die germanistische Linguistik*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

- Plummer, J. D. & Maynard, L. (2014). Building a Learning Progression for Celestial Motion: An Exploration of Students' Reasoning about the Seasons. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(7), 902–929.
- Pluta, W. J., Chinn, C. A. & Duncan, R. G. (2011). Learners' Epistemic Criteria for Good Scientific Models. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(5), 486–511.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, 66(2), 211–227.
- Quick, T. & Grebe-Ellis, J. (2011). Wo wird das Bild einer unter Wasser liegenden Münze gesehen? *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Quick, T., Grebe-Ellis, J. & Passon, O. (2015). Ein genauer Blick auf die optische Hebung. *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(14), 26–44.
- R Core Team. (2017). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Redfors, A. & Ryder, J. (2001). University Physics Students' Use of Models in Explanations of Phenomena Involving Interaction between Metals and Electromagnetic Radiation. *International Journal of Science Education*, 23(12), 1283–1301.
- Ruiz-Primo, M. A. & Shavelson, R. J. (1996). Problems and Issues in the Use of Concept Maps in Science Assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(6), 569–600.
- Sandoval, W. A. (2003). Conceptual and Epistemic Aspects of Students' Scientific Explanations. *The Journal of the Learning Sciences*, 12(1), 5–51.
- Stefani, C. & Tsapalis, G. (2009). Students' Levels of Explanations, Models, and Misconceptions in Basic Quantum Chemistry: A Phenomenographic Study. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(5), 520–536.
- Steinke, I. (2013). Gütekriterien qualitativer Forschung. In U. Flick, E. von von Kardorff & I. Steinke (Hrsg.), *Qualitative Forschung: Ein Handbuch*. Reinbek bei Hamburg: rowohlt enzyklopädie.
- Suárez, M. (1999). The Role of Models in the Application of Scientific Theories: Epistemological Implications. In M. S. Morgan & M. Morrison (Hrsg.), *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Sciences*. Ideas in context. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Suárez, M. (2010). Scientific Representation. *Philosophy Compass*, 5(1), 91–101.
- Suppe, F. (2000). Understanding Scientific Theories: An Assessment of Developments, 1969–1998. *Philosophy of Science*, 67, 102–115.
- Teller, P. (2001). Twilight of the Perfect Model Model. *Erkenntnis*, 55(3), 393–415.
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2012). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Berlin: Springer Spektrum.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G. & Mamiala, T. L. (2002). Students' Understanding of the Role of Scientific Models in Learning Science. *International Journal of Science Education*, 24(4), 357–368.
- Upmeyer zu Belzen, A. & Krüger, D. (2010). Modellkompetenz im Biologieunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 41–57.

- Urbanowski, C. (2014). *Analyse der fachlichen Argumentation von Studenten anhand von Aufgaben zur optischen Brechung* (Masterarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin).
- Van Heuvelen, A. (1991). Learning to Think Like a Physicist: A Review of Research-Based Instructional Strategies. *American Journal of Physics*, 59(10), 891–897.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and Modeling the Process of Conceptual Change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45–69.
- Wagenschein, M. (2009). *Naturphänomene sehen und verstehen: genetische Lehrgänge ; das Wagenschein-Studienbuch* (H. C. Berg, Hrsg.). Bern: hep Verlag.
- Wagner, S. (2013). *Die Rolle von Abbildungen beim Problemlösen am Beispiel der optischen Brechung* (Masterarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin).
- Weber, T. (2003). *Kumulatives Lernen im Physikunterricht: Eine vergleichende Untersuchung in Unterrichtsgängen zur geometrischen Optik*. Studien zum Physiklernen. Berlin: Logos-Verlag.
- Wiesner, H. (1986). Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Bereich der Optik. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik / Chemie*, 34(13), 25–29.
- Wiesner, H. (1994). Ein neuer Optikkurs für die Sekundarstufe I, der sich an Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen orientiert. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 5(22), 7–15.
- Windschitl, M., Thompson, J. & Braaten, M. (2008). Beyond the Scientific Method: Model-Based Inquiry as a New Paradigm of Preference for School Science Investigations. *Science Education*, 92(5), 941–967.
- Wirtz, M. & Caspar, F. (2002). *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität*. Göttingen: Hogrefe.

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die Dissertation selbständig und nur unter Verwendung der von mir gemäß § 7 Abs. 3 der Promotionsordnung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät I, veröffentlicht im Amtlichen Mitteilungsblatt der Humboldt-Universität zu Berlin Nr. 17/2012 am 27.06.2012 angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

.....

Steffen Wagner

Berlin, 27. September 2017